



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

STUDIUM ZÁVISLOSTI GEOMETRIE KOUTOVÉHO SVARU NA PROCESNÍCH PARAMETRECH PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ KOROZIVZDORNÉ OCELI

EVALUATION OF THE FILLET WELD GEOMETRY ON PROCESS PARAMETERS FOR LASER
WELDING OF STAINLESS STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK POLÁŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Polášek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studium závislosti geometrie koutového svaru na procesních parametrech při laserovém svařování korozivzdorné oceli

v anglickém jazyce:

Evaluation of the fillet weld geometry on process parameters for laser welding of stainless steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při laserovém svařování koutových svarů v nerezové oceli závisí geometrie vzniklého svaru na procesních parametrech jako je výkon laseru a svařovací rychlost. Úkolem je u získaných svarů změřit jejich geometrii (šířku a hloubku) a uvést je do závislosti s výše uvedenými procesními parametry.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si základy laserového svařovacího procesu. Osvojit si základy měření geometrie svaru.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
2. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.
3. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

POLÁŠEK Marek: Studium závislosti geometrie koutového svaru na procesních parametrech při laserovém svařování korozivzdorné oceli

V této práci bylo provedeno svařování vzorků z důvodu studie vzniklé geometrie svaru v závislosti na procesních parametrech laseru. Svařování proběhlo bez přídavného materiálu s pomocí vláknového laseru. Použitý materiál byl korozivzdorná ocel ČSN EN 17 241. Z hodnot regresních koeficientů výsledných grafů vyplývá, že vzniklé změny geometrie svaru, šířka a hloubka se mění v závislosti na svařovacím výkonu vcelku lineárně. Zvláště hloubka svaru je v technické praxi běžný požadavek, změřené výsledky v experimentu lze použít pro nastavení procesních parametrů, k dosažení požadované hloubky svaru. Některé svary vykazují svarové vady, jedná se o pórovitost, která je zapříčiněná tvorbou keyhole, vlivem značně dynamického procesu. V technicko-ekonomickém zhodnocení byla odhadnuta cena za jeden metr svaru pro každou použitou rychlost svařování.

Klíčová slova: Ocel 17 241, svařování laserem, geometrie svaru, vady svaru

ABSTRACT

POLÁŠEK Marek: Evaluation of the fillet weld geometry on process parameters for laser welding of stainless steel

The present thesis deals with welding of samples to examine the resulting geometry of the weld in dependence on process parameters of the laser. Welding was carried out without additional material using a fibre laser. The material used was stainless steel ČSN EN 17 241. The values of regression coefficients of the resulting graphs show that the changes in the weld geometry - width and depth - vary quite linearly depending on the welding performance. Especially the weld depth is a common requirement in technical practice; the measured results of the experiment can be used to set the process parameters to achieve the desired depth of weld. Some welds exhibit weld defects such as porosity caused by formation of the keyhole due to a large dynamics of the process. The technical-economic evaluation offers a price estimate for one meter of weld for each welding speed used.

Keywords: 17 241stainless steel, laser welding, weld geometry, weld defects

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁŠEK, Marek. *Studium závislosti geometrie koutového svaru na procesních parametrech při laserovém svařování korozivzdorné oceli*. Brno, 2015. 40s, 6 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 28.5.2015

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD 9

1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE 10

1.1 Princip laserové technologie 10

1.2 Konstrukce laseru 11

1.3 Lasery v průmyslu 13

1.3.1 CO₂ lasery 13

1.3.2 Nd:YAG laser 15

1.3.3 Diskový Yb:YAG laser 16

1.3.4 Vláknový laser 17

1.3.5 Diodový (polovodičový) laser 18

2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ 19

2.1 Režimy svařování 21

2.2 Operační módy laseru 23

3 SVAROVÉ SPOJE 24

3.1 Vady ve svarech 25

3.2 Metalografická zkouška 27

3.3 Svařitelnost korozivzdorné oceli 28

3.3.1 Charakteristika korozivzdorné oceli 28

4 PRAKTICKÁ ČÁST 31

4.1 Charakteristika materiálu v experimentu 31

4.2 Vzorek 32

4.3 Příprava a realizace 32

4.4 Hodnocení výsledků 34

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 38

6 ZÁVĚRY 40

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků a tabulek

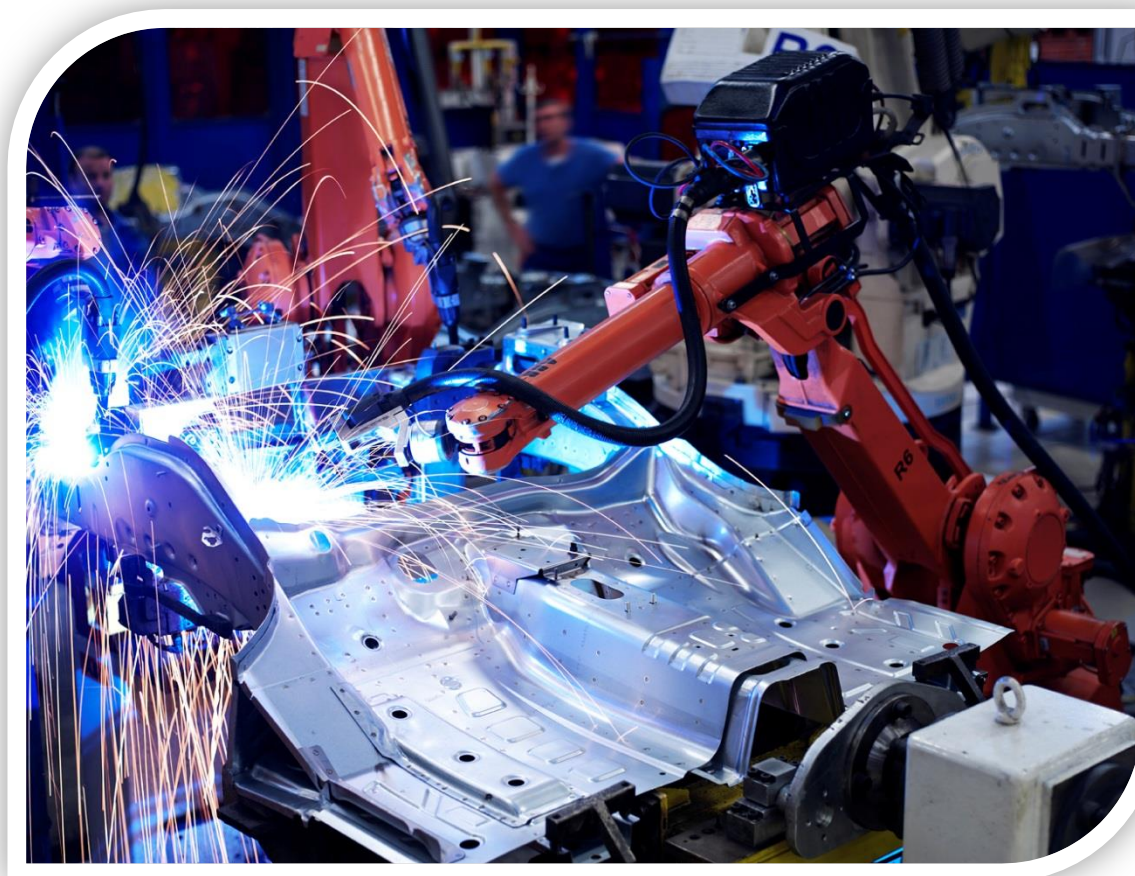
Seznam příloh

ÚVOD [5],[20],[38]

Možností pro vytvoření nerozebíratelného spoje dvou a více součástí je v průmyslové praxi více, využívají se metody lepení, pájení, svařování, ale i nýtování. Právě svařování je jednou z nejběžnějších metod, ať už v případě spojování konstrukcí, různých oprav např. odlitků, apod.

V dnešní době se technologie rozvíjejí a zdokonalují za účelem produktivnější a pokud možno ekonomičtější výroby. Technologie svařování není výjimkou, snažíme se o zvýšení kvality svarové housenky, snížení tepelně ovlivněné oblasti, snížení počtu vměstků v roztaveném kovu a odstranění vad ve svaru, dostatečné provaření a zvýšení mechanických vlastností svaru. Proto je vhodné použití laserové technologie.

Od sestrojení prvního modelu uplynulo již několik let, proto lasery prošly velkým vývojem a zdokonalením. V současnosti se vyrábí mnoho různých typů laserů lišících se zejména konstrukcí, poskytovaným pracovním výkonem, účinností i charakterem výstupního laserového svazku. Laser se stále více používá jako výrobní nástroj a nachází své uplatnění v mnoha odvětvích, především v automobilovém průmyslu, letectví, nebo při výrobě vysokotlakých zařízení, elektrotechnice a v mnoha dalších aplikacích. Hlavní předností laserového zpracování materiálu je vysoká flexibilita, malá tepelně ovlivněná oblast, různorodost materiálu, který se dá laserem zpracovávat, a vysoká rychlost dosahovaná při svařování. Hlavní nevýhodou laserové technologie je vysoká pořizovací cena.

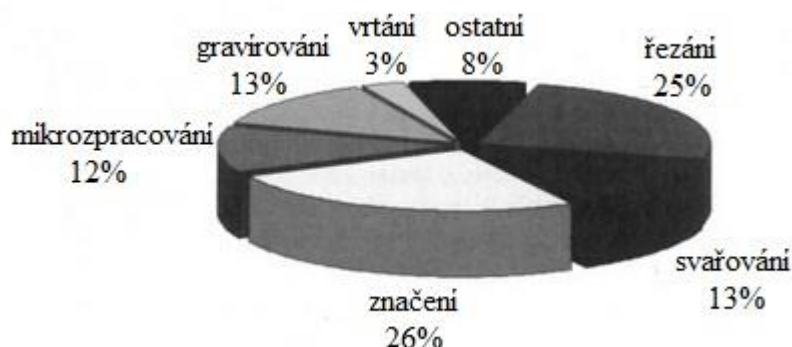


Obr. 1 Svařovací robot [38]

1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE [20],[24]

V minulosti byla laserová technologie pro průmyslové využití považovaná za obtížně dosažitelnou. Avšak s ubíhajícím časem a modernější dobou získávala stále širší uplatnění dokonce skoro ve všech oblastech výrobních aplikací, vojenské techniky, medicíny a běžného užívání.

Při zaměření jen na průmyslovou praxi, lze pomocí laseru zefektivnit řadu aplikací např. zvýšení výrobní rychlosti, snížení výrobních nákladů a dosažení špičkové kvality; proto je tato technologie obsažená ve velké řadě výrobních linek. Každý systém má jiné předpoklady využití vzhledem ke svým parametrům. Přehled průmyslového využití je znázorněn v grafu na obr. 2.



Obr. 2 Využití v průmyslu [24]

- Jednotlivé přednosti laserové technologie:
 - jednoduché zařazení do výrobní linky
 - snížení výrobních nákladů
 - preciznost zpracování
 - životnost
 - není nutný spotřební materiál
 - použití pro široké spektrum materiálů
 - vysoká flexibilita
 - vysoká kvalita a přesnost
- Charakteristika laseru - slovo LASER pochází z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. V českém překladu to znamená, že se jedná o zesílení světla stimulovanou emisí záření. K tomuto zesílení světla dochází opakovanými průchody fotonů médii se specifickými vlastnostmi.

1.1 Princip laserové technologie [20],[22],[23],[33],[36]

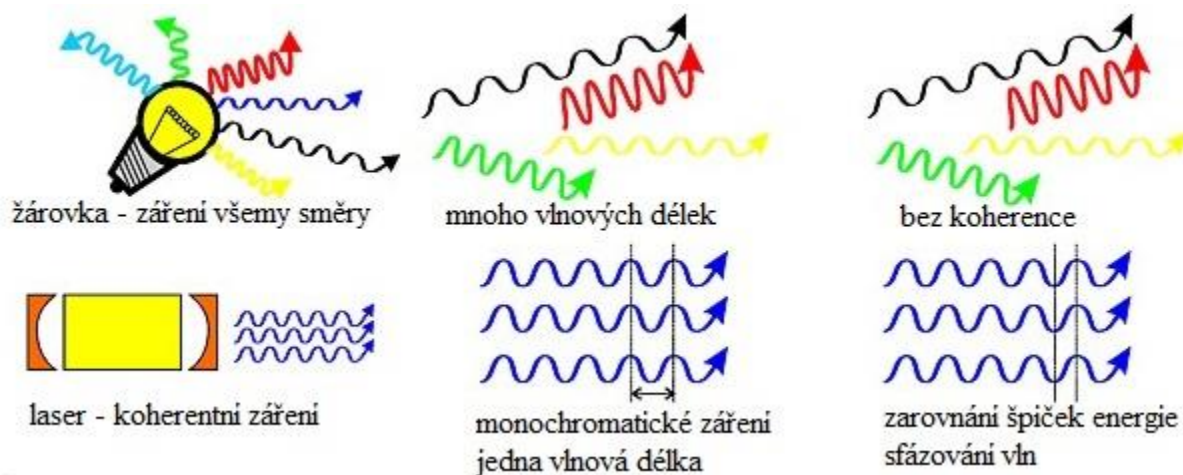
Laser je zdroj, který generuje zvláštní druh světla, který se v přírodě samovolně nevyskytuje. Obecně lze říci, že je to optický zesilovač generující elektromagnetické záření neboli světlo, pomocí procesu stimulované emise fotonů - tento proces vychází ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky.

Laserový paprsek vznikne pomocí určitého způsobu buzení vhodného aktivního prostředí, které se nachází v laserovém zdroji a je jeho hlavní částí. Toto buzení dodává energii do laseru a následnou reakcí aktivního prostředí na buzení dojde k potlačení samovolné (spontánní) emise a podpoří vznik stimulované emise fotonů.

Postupným nashromážděním fotonů díky optickému rezonátoru, který je tvořen většinou zrcadly, dochází k energeticky výraznému zesílení. Po zesílení dochází k následnému výstupu z laserového zdroje ve formě paprsku. Takto vzniklé záření je koherentní (má stejný směr kmitání, fázi i frekvenci vlnění) a monochromatické (vlnění o jediné vlnové délce), nerozbíhá

se na rozdíl od běžného tepelného zářiče. Srovnání záření běžného tepelného zářiče a laseru je zobrazeno na obr. 3.

Vlastnosti paprsku můžou být přes průchod optických komponentů dále upraveny, což se převážně využívá u průmyslových laserů; takto upravený paprsek se zaostří pomocí objektivu a vstupuje do pracovního prostoru.

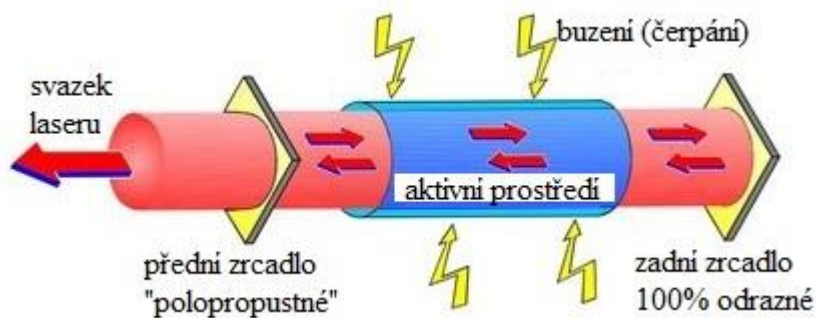


Obr. 3 Srovnání emise záření laseru a běžného tepelného zdroje [22]

- Stimulovaná emise záření - při tomto procesu dopadá foton na atom nebo molekulu ve vyšším energetickém stavu a následně způsobí jeho přechod do nižšího stavu. Při přechodu dojde k dalšímu vyzáření fotonu, ale původní foton se nepohlí, oba se pohybují spolu stejným směrem jako ten, který vyvolal tuto emisi. Takto se dosáhne lavinovitě se opakujícího procesu, který je důležitý pro vznik laserového záření.

1.2 Konstrukce laseru [2],[11],[20],[33]

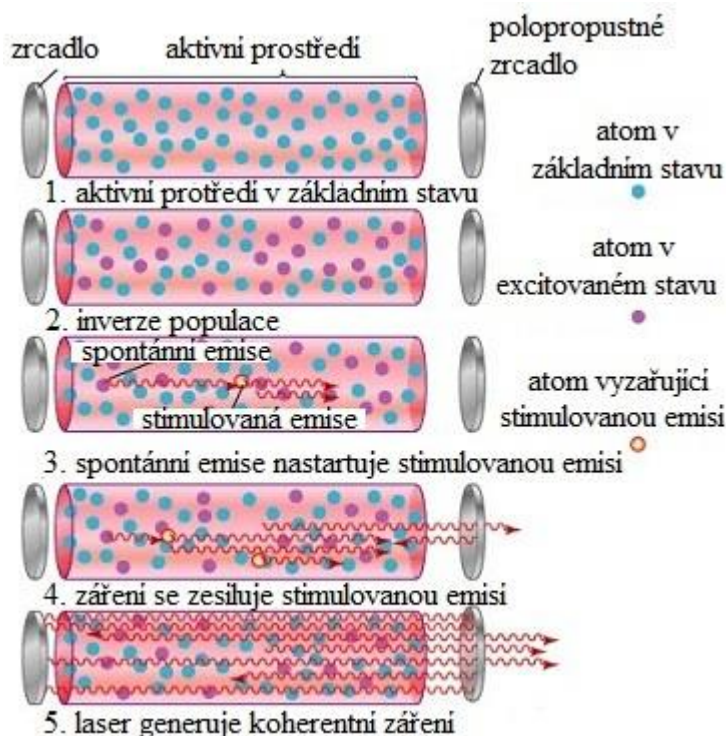
Jednotlivé konstrukce laserů se od sebe liší podle typu použití, ale každý laser obsahuje tři základní části. Základní schéma laseru je zobrazeno na obr. 4.



Obr. 4 Základní schéma laseru [33]

- Aktivní laserové prostředí - v tomto prostředí dochází k zesilování záření.
- Zdroj buzení - dodává energii do aktivního prostředí a je nutný pro vznik stimulované emise fotonů. Způsoby buzení mohou být např. chemickou reakcí, elektrickým proudem, osvětlením apod.

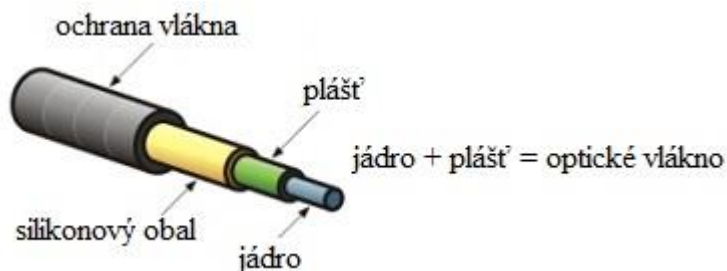
- Optický rezonátor - je tvořen zrcadly ohraničujícími aktivní prostředí; jedno zrcadlo má 100 % odrazivost a druhé je tzv. částečně propustné. Fotony se odrážejí zpět do aktivního prostředí a působí jako podnět k další emisi. Odrazy zesilují záření a po dosažení kritického množství opouští polopropustným zrcadlem svazek záření. Princip jeho činnosti je zobrazen na obr. 5.



Obr. 5 Činnost optického rezonátoru a vznik stimulované emise [33]

Dále pak převážně v průmyslových laserech:

- Expandér - systém čoček a clon, který upravuje výstupní průměr a zvyšuje kvalitu svazku, ale dochází v něm ke ztrátám energie, která má vliv na účinnost systému. V řadě aplikací je ovšem kvalita upřednostněna před výkonem.
- Laserová hlavice, optické vlákno - do této části je svazek přiveden pomocí čoček a zrcadel a jejich prostřednictvím do požadovaného místa. Materiál pro optické komponenty je závislý na vlnové délce záření, nesmí ho pohlcovat. Používají se leštěné kovy nebo dielektrické sklo. Schéma optického vlákna je zobrazeno na obr. 6.



Obr. 6 Schéma optického vlákna [2]

- Chlazení - vlivem vzniklých energetických ztrát dochází k výraznému ohřevu součástí. Používané chlazení je především pomocí kapaliny, nejčastěji je to demineralizovaná voda.
- Řídicí počítač - obsahuje software pro nastavení volitelných parametrů, většinou bývá již zabudovaný do opláštění. Pohyby mohou být ovládány např. pomocí G-kódu, avšak pro složitější ovládání a geometrie se používají 3D programy.

1.3 Lasery v průmyslu [4],[5],[16],[34]

V dnešní době se vyrábí řada různých typů laserů, v průmyslových aplikacích se využívá pět hlavních typů laserů. Jednotlivé typy se dále dělí podle typu buzení, aktivního prostředí, provozního režimu a dalších parametrů. Každý využívaný typ má své výhody/nevýhody a je vhodný pro různé typy aplikací. Základní přehled jednotlivých typů je zobrazen v tabulce č. 1.

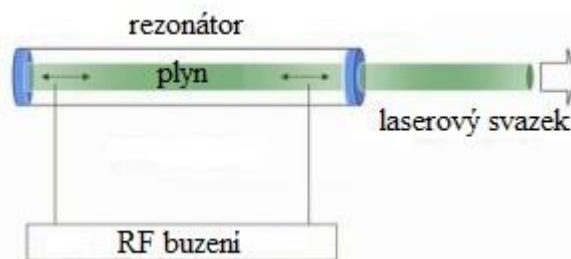
Tab. č. 1 Přehled průmyslových laserů [4],[5],[16],[34]

Typ laseru	Vlnová délka [μm]	Buzení	Účinnost	Režim
CO ₂	10,6	Elektricky	~15%	CW/PW
		Radiofrekvenčně	~10%	
Nd:YAG	1,06	Laserové diody	~7%	CW/PW
		Lampy	~4%	
Diskový	1,03	Laserové diody	~25%	CW
Vláknový	1,07	Laserové diody	~30%	CW/PW
Diodový (polovodičový)	0,8-1,1	Elektricky	~60%	CW

1.3.1 CO₂ lasery [5],[7],[16],[25],[34],[42],[44]

Jedná se o typ plynového laseru, jehož aktivním prostředím je směs plynů obsahujících CO₂. V průmyslu jsou tyto lasery buzené pomocí rádiové frekvence nebo elektrickým výbojem a dělí se z hlediska uzavřenosti rezonátoru na lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a na průtočné lasery, kde plyn proudí rezonátorem bez ustání, aby se dosáhlo vysokého výkonu. Dále se dají rozdělit i podle proudění plynu v aktivním prostředí na lasery s podélným prouděním nebo s příčným prouděním plynu. Obecné schéma laseru je na obr. 7.

V průmyslu se lasery nejčastěji využívají pro řezání, gravírování, značení plastů, organických materiálů, látek, kůže, dřeva a laminátu. Energie vlnové délky vydávaná z CO₂ laseru je vyšší než u ostatních laserů a proto se velmi efektivně vstřebává do materiálu. Absorbovaná energie se přemění na teplo, které odebírá materiál přímo ve stopě laseru. Další průmyslovou aplikací je řezání a svařování kovů. Schéma průmyslového zařízení je na obr. 9.

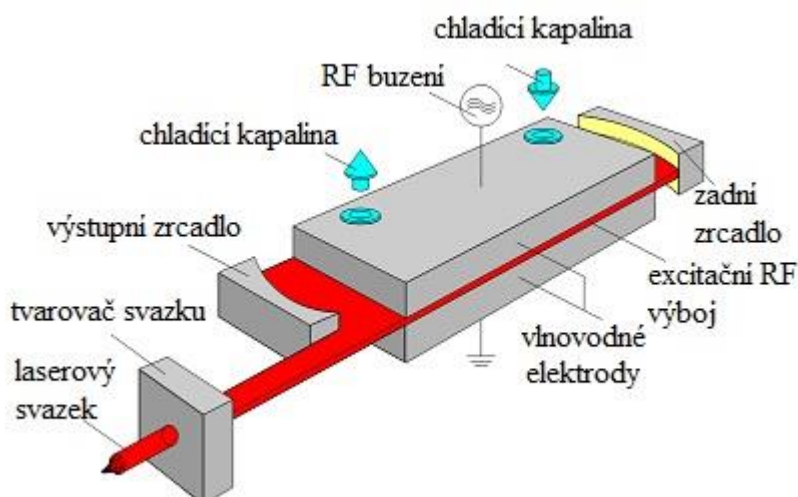


Obr. 7 Schéma CO₂ laseru [7]

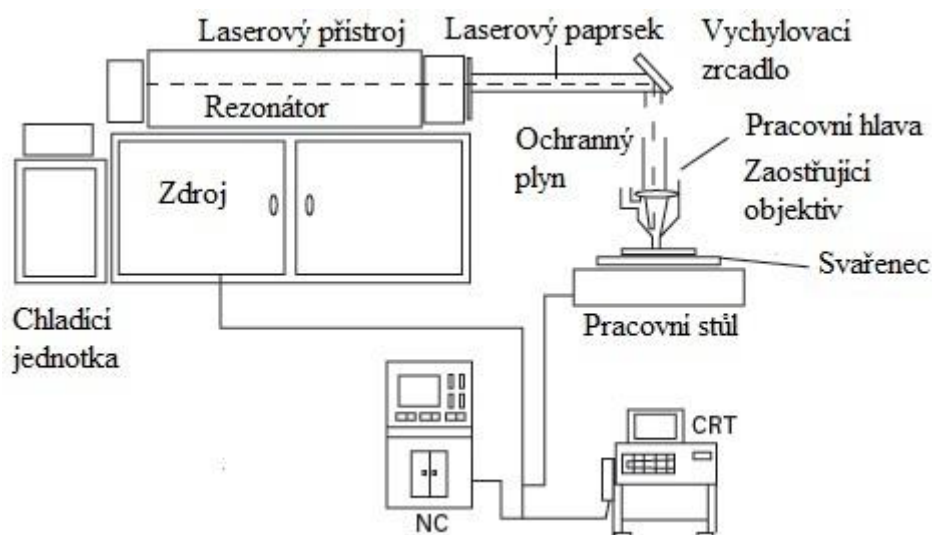
Vzhledem k vysoké vlnové délce nelze svazek vést optickým vláknem, ale je nutné použít zrcadla, což je nevýhoda kvůli složitosti optického zařízení a nutnosti kalibrace a nárokům na čistotu a údržbu.

Laserové záření u CO₂ laserů vzniká v prostředí naplněném kombinací vzácných plynů a plynu CO₂. Buzení aktivního plynu se provádí radio-frekvenčním vlněním. Toto vlnění probíhá mezi dvěma vlnovodnými elektrodami, které jsou využity vzhledem ke svým rozměrům také k difuznímu chlazení plynu v rezonátoru. Aktivní prostředí se po nějaké době znehodnotí, jeho životnost se odhaduje na cca 10 000 hodin provozu, poté je nutná výměna. Na obr. 8 je zobrazen nejnovější typ difúzně chlazeného SLAB laseru.

Mezi hlavní přednosti CO₂ laserů se řadí především jejich integrace do výrobních linek, jsou ekonomicky výhodné, snadno obsluhovatelné a dosahují vysokých výkonů.



Obr. 8 Princip difúzně chlazeného, rádio-frekvenčně buzeného SLAB CO₂ laseru [34]



Obr. 9 Schéma průmyslového zařízení CO₂ laseru [16]

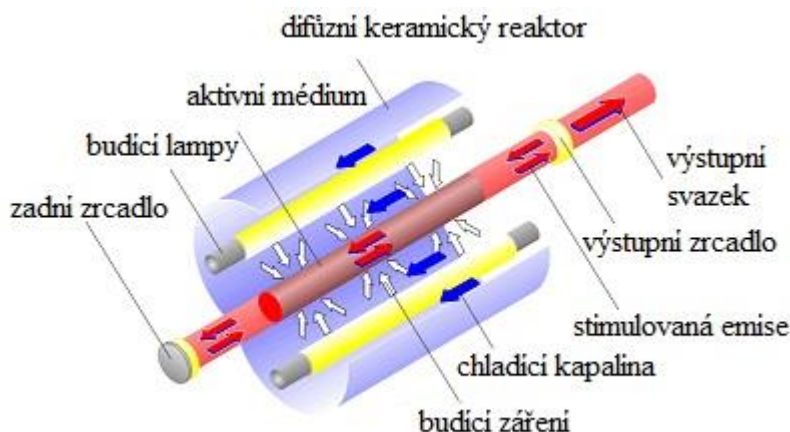
Tab. č. 2 Podrobný přehled vlastností CO₂ laseru [5],[16],[34]

Vlnová délka [μm]	Účinnost [%]	Výkon [kW]	Intenzita v ohnisku [W·cm ⁻²]	Životnost [h]
10,6	5÷15	do 40	10 ⁶ ÷10 ⁸	20 000

- Výhody: vysoký výkon, dobrá kvalita svazku.
- Nevýhody: vedení paprsku optickou dráhou, nutná častější údržba, velký důraz na chlazení, dražší provozní náklady.

1.3.2 Nd:YAG laser [5],[16],[26],[34],[42],[44]

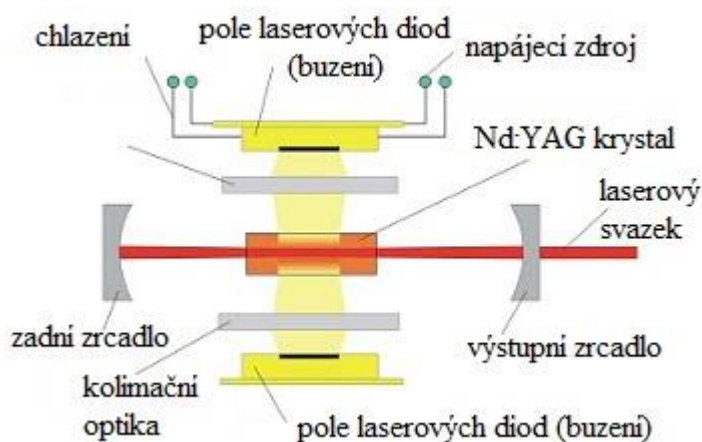
Jedná se o typ pevnolátkového laseru, kde aktivní prostředí tvaru tyče tvoří krystal yttrito-hlinitý-granát dopovaný ionty neodymu značeného Nd. Jedná se o historicky nejstarší typ laseru použitý v průmyslu. Pro buzení aktivního prostředí se používají výbojky nebo laserové diody. Na obr. 10 je znázorněn základní princip Nd:YAG laseru.



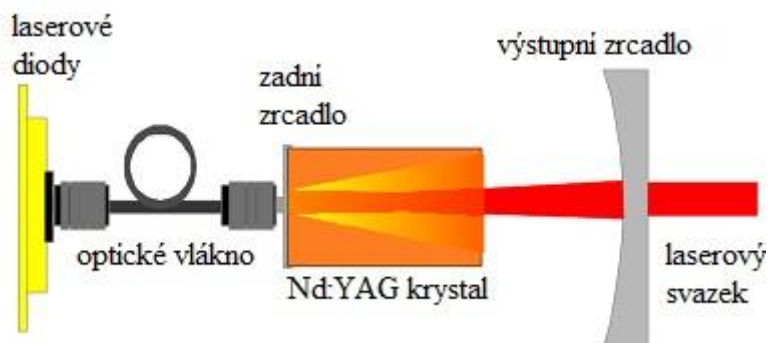
Obr. 10 Základní princip Nd:YAG laseru [34]

Nd:YAG buzené výbojkami mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, právě kvůli použití výbojek. Velká část energie se nevyužije a přemění se na teplo, proto je nutné chlazení. Tyto lasery se využívají především v pulsním režimu pro aplikace s požadavkem hlubokého průvaru, ale malé tepelně ovlivněné oblasti u svařování, a také pro vrtání.

Nd:YAG buzené laserovými diodami se rozlišují podle uspořádání rezonátoru na dva typy, buď na lasery s bočním buzením, schematicky zobrazené na obr. 11, nebo na lasery se zadním buzením, schematicky zobrazeno na obr. 12. V případě zadního buzení se budící záření vede optickým vláknem do YAG krystalu. Výhodou tohoto vedení je možnost umístění diod externě mimo rezonátor. U zadního buzení se dosahuje lepší kvality svazku, ale nižších výkonů, u bočního buzení se dosahuje nižší kvality svazku, ale vyšších výkonů. Tyto lasery se využívají především pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. Používají se hlavně v tzv. Q-switch pulsním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulzy.



Obr. 11 Přímé buzení [34]



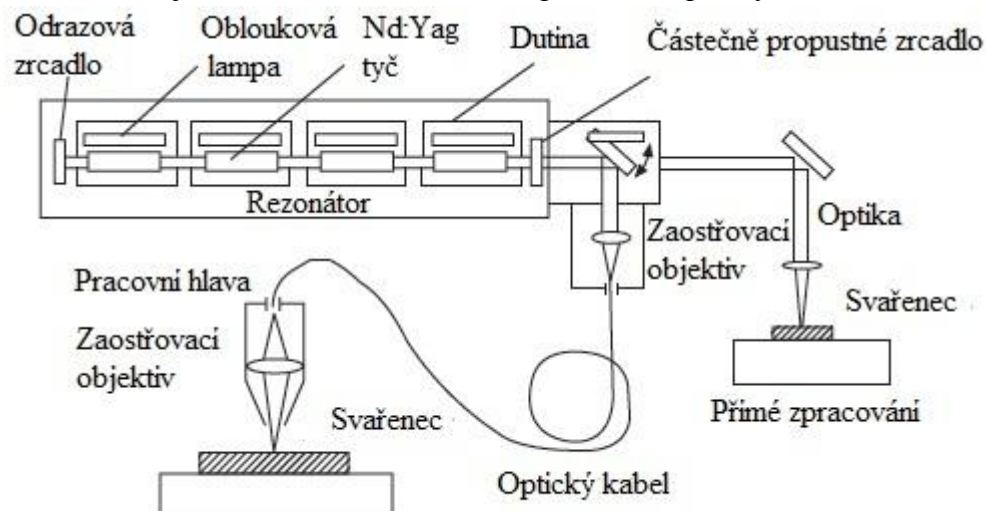
Obr. 12 Princip Nd:YAG laseru buzeného přes optické vlákno [34]

Tab. č. 3 Přehled výhod a nevýhod laseru podle typu buzení [34]

Laser	Typ buzení	Výhody	Nevýhody
Nd:YAG	Výbojka	Vysoká energie v pulzu	Nižší účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady, krátká životnost
	Laserová dioda	Vyšší účinnost, delší životnost, menší nároky na chlazení	Nižší energie v pulzu

Rozdíl mezi CO₂ a Nd:YAG laserem je právě možnost navázat laserový paprsek do optického vlákna a díky tomu lze dosáhnout značné flexibility pro svařování součástí různých tvarů a rozměrů. Na obr. 13 je zobrazeno schematické provedení průmyslového laseru Nd:YAG,

zobrazení možnosti použití optického vlákna nebo optických komponentů pro dopravení laserového svazku do pracovního prostředí.



Obr. 13 Schéma průmyslového laseru Nd:YAG a možnosti provedení [16]

Tab. č. 4 Podrobný přehled vlastností Nd:YAG laseru [5],[16],[34]

Buzení	Vlnová délka [μm]	Účinnost [%]	Výkon [kW]	Intenzita v ohnisku [W·cm ⁻²]	Životnost [h]
Výbojka	1,06	1÷4	do 7	10 ⁵ ÷10 ⁷	1 000
Laserová dioda	1,06	2÷7	do 7	10 ⁶ ÷10 ⁸	10 000

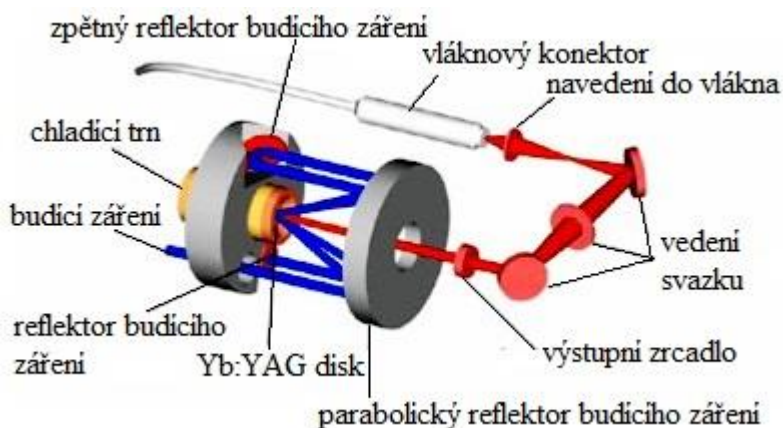
- Výhody: snadná integrace do výrobních linek, dlouhá životnost, spolehlivé komponenty zařízení, vysoká kvalita paprsku, nízké provozní náklady, jednoduchost konstrukce, možnost vedení optickým vláknem.
- Nevýhody: nižší účinnost, velký elektrický příkon, nároky na chlazení.

1.3.3 Diskový Yb:YAG laser [5],[16],[20],[26],[34],[42]

Jedná se o typ pevnolátkového laseru, modifikace Nd:YAG laseru. Aktivní prostředí tvoří matrice krystalu yttrito-hliníty-granát dopovaný ionty yterbia značeného Yb. Název diskový nebo také kotoučový, vychází z charakteristického tvaru aktivního prostředí, které je formováno do tvaru nízkého válce o určité výšce a průměru. Buzení probíhá laserovou diodou, přes optické vlákno a je absorbováno celkovou tloušťkou aktivního prostředí, díky čemuž dosahuje vysoké účinnosti buzení, až 90 %. Stěna diskového aktivního prostředí je zároveň zadním zrcadlem optického rezonátoru a krystal je uchycen chladícím trnem, který zajišťuje stálou teplotu. Základní schéma diskového laseru je zobrazeno na obr. 14.

Při porovnání diskového laseru a Nd:YAG laseru je hlavní výhodou nezávislost kvality svazku na výkonu laseru, rovný teplotní profil po celé ploše disku a dosažení vysokých výkonů.

V průmyslové praxi se využívá pro výkonově náročné operace, pro svařování a řezání. Velmi úzkým svazkem je možné svařovat materiály větších tloušťek s nízkým tepelným ovlivněním oblasti.



Obr. 14 Schéma diskového laseru [20]

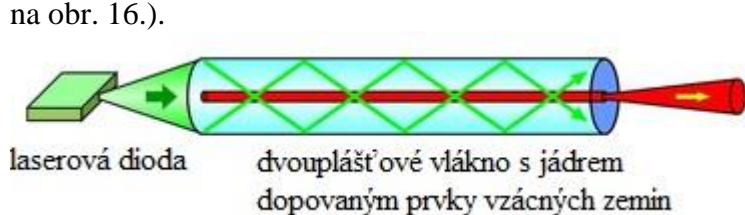
Tab. č. 5 Podrobný přehled vlastností Yb:YAG laseru [5],[16],[34]

Vlnová délka [μm]	Účinnost [%]	Výkon [kW]	Intenzita v ohnisku [W·cm ⁻²]	Životnost [h]
1,03	15÷25	do 16	10 ⁶ ÷10 ⁸	10 000

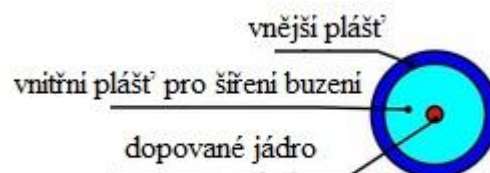
- Výhody: dosažení vysokých výkonů, dobré chlazení zařízení, výborná kvalita výstupního svazku, snadná integrace do výrobních linek.
- Nevýhody: menší životnost, nižší účinnost, vyšší náklady.

1.3.4 Vláknový laser [5],[16],[27],[34],[42],[44]

Jedná se o technologicky nejmodernější pevnolátkový laser, kde je aktivním prostředím dlouhé optické vlákno, které je dopované prvkem Ytterbia. Buzení zajišťují laserové diody a je vedeno pomocí optické spojky do aktivního vlákna. Rezonátor laseru je místo zrcadel tvořen Braggovými mřížkami, což jsou struktury tvořené přímo na optickém vlákne (schematicky zobrazeno na obr. 15, podrobnější zobrazení průřezu obalu aktivního vlákna je na obr. 16.).

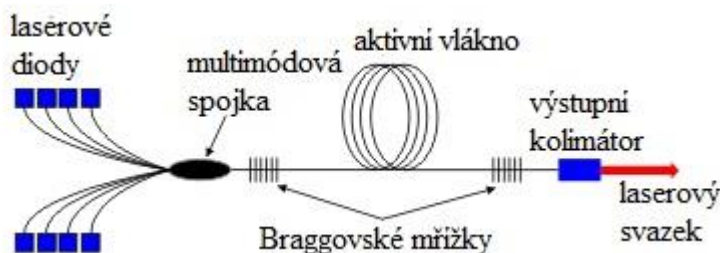


Obr. 15 Rezonátor vláknového laseru [27]



Obr. 16 Průřez obalu aktivního vlákna [27]

Z vlákna vychází laserový paprsek, který je dále upravován optickými komponenty dle potřeby a vstupuje do pracovního prostoru. Svazek má vysokou kvalitu. Vzhledem ke geometrii aktivního prostředí je dostatečné chlazení vzduchem. Pro většinu průmyslových aplikací je dostačující výkon z jednoho vlákna, dá se však kombinovat více vláken dohromady a dosáhnout tak extrémního výkonu, tato kombinace je zobrazena na obecném schématu obr. 17.



Obr. 17 Schéma vláknového laseru [34]

Tyto lasery můžou pracovat v kontinuálním nebo pulsním provozu. Při pulsním režimu je energie akumulována po delší dobu, díky čemuž má paprsek vyšší výkon. Mezi jednotlivými pulzy dochází k časovému prodloužení, které je potřebné pro akumulaci energie. V kontinuálním režimu nedochází k velké akumulaci energie a tím pádem ani k následným výkonovým výkyvům systému.

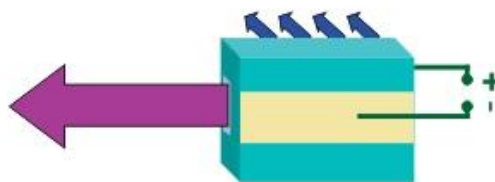
Tab. č. 6 Podrobný přehled vlastností vláknového laseru [5],[16],[34]

Vlnová délka [μm]	Účinnost [%]	Výkon [kW]	Intenzita v ohnisku [W·cm ⁻²]	Životnost [h]
1,07	20÷30	do 100	10 ⁶ ÷10 ⁸	100 000

- Výhody: vysoká účinnost, vysoká kvalita svazku, vysoká životnost, minimální nároky na údržbu, výborná integrace do výrobní linky, nejnižší provozní náklady, vysoká spolehlivost zařízení, velkou výhodou je jednoduchost provedení, celý laser tvoří optické vlákno.

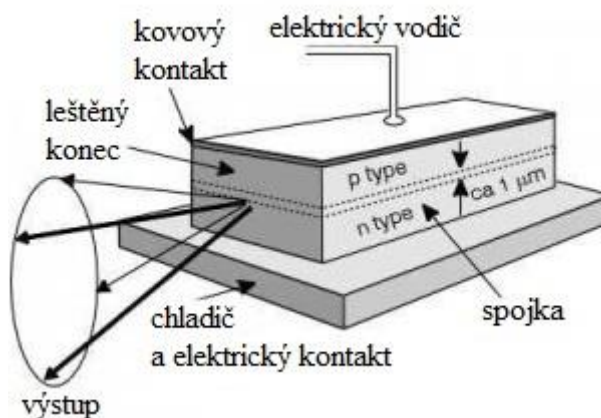
1.3.5 Diodový (polovodičový) laser [5],[7],[16],[34],[42],[44]

Aktivním prostředím tohoto laseru je polovodičová dioda buzená elektrickou energií. Laser vzniká sdružováním laserových diod a to buď do bloků, řad nebo baterií v závislosti na požadovaném výkonu, který se pohybuje od mW až do kW. Tyto lasery mají vysokou účinnost díky přímé přeměně elektrické energie na světelné záření, která je znázorněná na obr. 18, ale kvalita laserového svazku je nízká.



Obr. 18 Zobrazení přímé přeměny [34]

Obr. 19 znázorňuje schéma diodového laseru. Rezonátor toho laseru tzv. Fabry-Perotův rezonátor tvoří leštěné čelní plochy polovodiče, které jsou kolmé na spojku. Laserový svazek se generuje přímo v polovodiči. Takto vystupující svazek má velkou divergenci, k jeho kolimaci se využívají válcové mikročochky, které jsou umístěny na stěně bloku. V průmyslové praxi se využívá především ke svařování a povrchové úpravě materiálu.



Obr. 19 Schéma diodového laseru [7]

Tab. č. 7 Podrobný přehled vlastností vláknového laseru [5],[16],[34]

Vlnová délka [μm]	Účinnost [%]	Výkon [kW]	Intenzita v ohnisku [W·cm ⁻²]	Životnost [h]
0,8-1,0	30÷60	až 10	10 ³ ÷10 ⁵	15 000

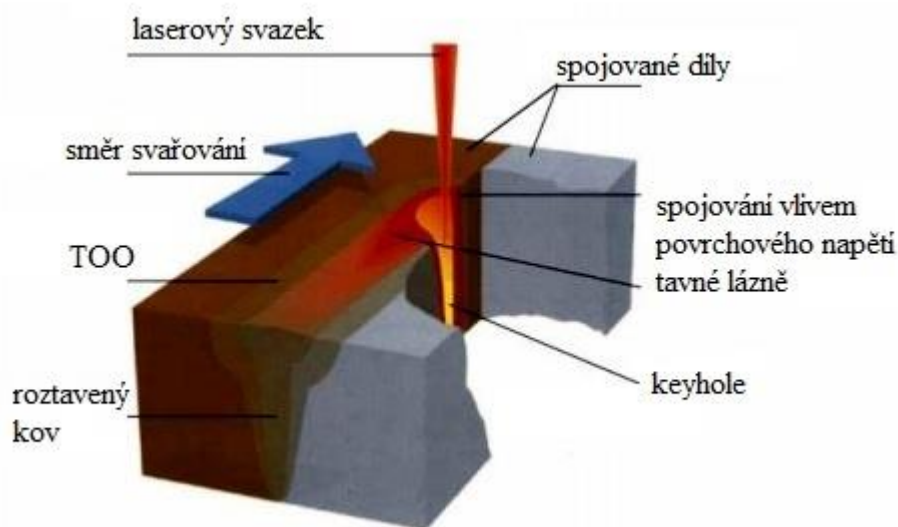
- Výhody: vysoká účinnost, malé rozměry, jednoduchost konstrukce, použití optického vlákna, nízká hmotnost.
- Nevýhody: nízká kvalita laserového svazku, nižší životnost

2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ [11],[15],[16],[18],[19],[20],[23],[28],[37]

V dnešní době patří laserové svařování mezi moderní technologie i přesto, že první laboratorní pokusy při svařování byly zkoušeny ihned po sestrojení prvního prototypu laseru v 60. letech 20. století. První skutečné uplatnění v průmyslu začalo počátkem osmdesátých let 20. století a to pomocí pevnolátkového laseru Nd:YAG a následným postupným vývojem CO₂ laserů, u kterých docházelo k postupnému zvyšování dosahovaného výkonu.

Za moderní technologii je laserové svařování považováno právě díky vývoji nových a výkonnějších typů laserů, ale také kvůli používání nových materiálů, které lze jen obtížně svařovat jinými metodami.

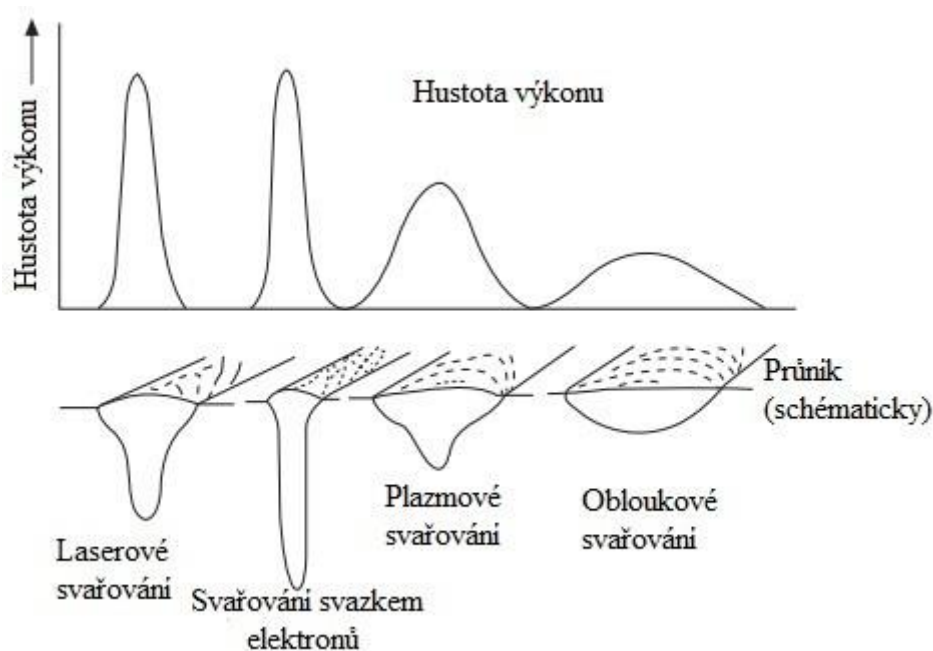
Svařování laserem je efektivní metodou pro výrobu nerozebíratelného spoje. Jedná se o bezkontaktní metodu svařování. Touto technologií dosáhneme úzkého a hlubokého svaru s vysokou kvalitou a dobrým povrchovým vzhledem. Srovnání svařovacích metod je v tabulce č. 8, schématické zobrazení geometrie svarů různých metod svařování v závislosti na hustotě výkonu je zobrazeno na obr. 21 a princip svařování laserem je zobrazen na obr. 20.



Obr. 20 Schéma laserového svařování – penetrační metoda [37]

Tab. č. 8 Porovnání metod svařování [11],[16]

Metoda	Hustota energie [W·cm ⁻²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [m·min ⁻¹]
Laser	10 ⁷ - 10 ⁹	25	0,1-0,5	až 10
Plamen	10 ³	3	3	0,01
El. oblouk	10 ⁴	4	2	0,5-3
Plazma	10 ⁶	až 12	1	0,5-5
El. paprsek	10 ⁸	200	0,03	0,5-5



Obr. 21 Schéma geometrie svarů různých metod svařování v závislosti na výkonu [16]

Hlavními přednostmi svařování laserem jsou:

- vysoká rychlost svařování
- malé deformace a zbytkové vnitřní pnutí
- malá tepelně ovlivněná oblast, která vznikla v okolí svaru
- svařování bez přídavného materiálu
- malé cílené a dobře lokalizované tepelné zatížení
- vysoká produktivita práce a vyšší hloubka průvaru
- nastavitelná hustota vnesené energie

Tato technologie je vhodná zejména pro realizaci náročných a dokonalých svarových spojů vzhledem k tomu, že můžeme lokálně svařovat v hůře přístupných místech na rozdíl od jiných způsobů svařování, kde by to bylo obtížné. Je vhodná pro sériovou výrobu a díky malé setrvačnosti paprsku je vhodná i pro automatizaci.

Hlavní aplikace jsou:

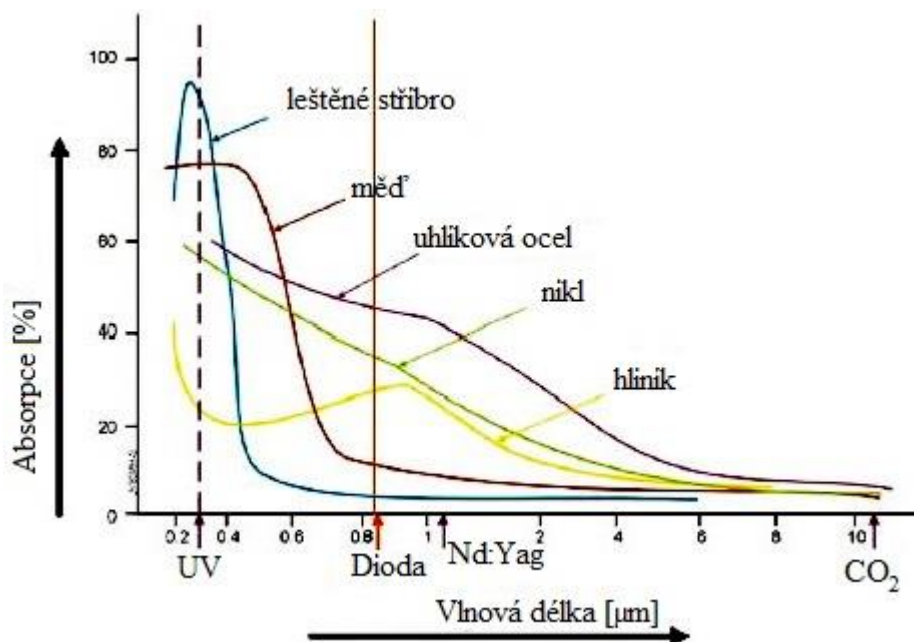
- automobilový průmysl
- přesné strojírenství
- zbrojní výroba
- elektrotechnika (konektory, výroba článků)
- zdravotní technika (chirurgické nástroje, lékařské komponenty)
- opravárenství (opravy nástrojů a forem)

Laserová technologie nabízí možnost svařování materiálů od tenkých fólií o tloušťce asi 0,01 mm až po materiály s tloušťkou do 50 mm při použití ochranného plynu.

Materiály vhodné pro svařování:

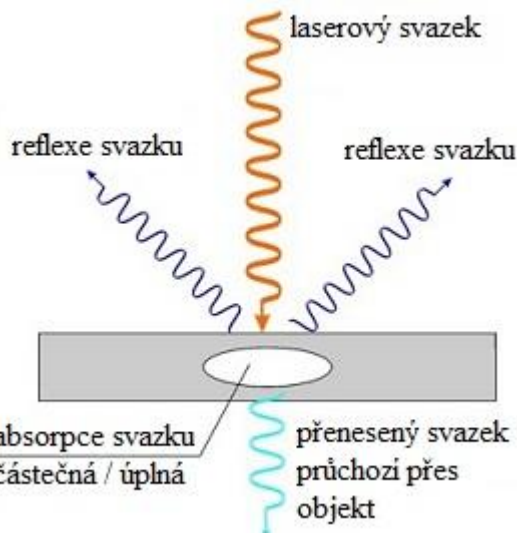
- většina materiálu svařitelných běžnými metodami, ve většině případů mnohem rychleji a s lepším vzhledovým výsledkem.
- Plasty
- Nerezavějící oceli
- Titanové, chromniklové a zirkonové slitiny
- Sklo

Jednou z hlavních nevýhod laseru pro aplikace je absorpce záření materiálu v závislosti na vlnové délce zobrazené na obr. 22.



Obr. 22 Závislost absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [18]

Laserový svazek může materiálem procházet, docházet k absorpci záření, nebo změnit své vlastnosti. Na obrázku č. 23 lze pozorovat chování laserového svazku, kdy při dopadu na plochu materiálu může dojít k odrazu, k absorpci anebo k částečnému průchodu skrz daný objekt. Všeobecně se počítá s odrazem 4 %, ale u vysoce reflexivních materiálů může dojít i k 90 % odrazu.

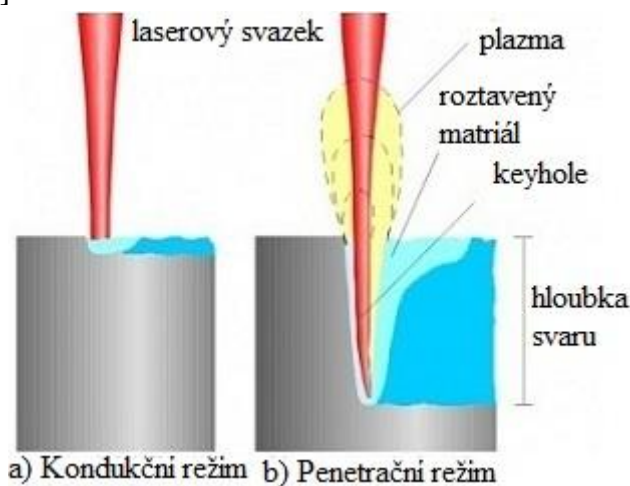


Obr. 23 Chování svazku při dopadu [23]

2.1 Režimy svařování [3],[11],[19],[29],[37]

Využívá se dvou základních metod svařování. Jedná se o kondukční režim neboli svařování vedením tepla a penetrační režim, který je označován jako tzv. „keyhole“ metoda. Schématické zobrazení těchto metod je na obr. 24.

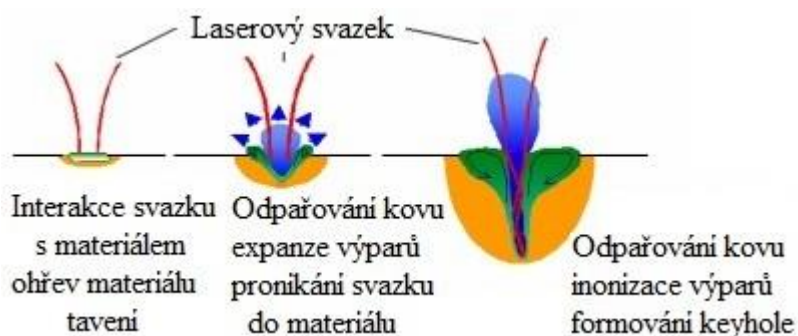
- Kondukční režim - jedná se o tzv. metodu vedení tepla vzniklého laserovým paprskem, kde se materiál taví absorpcí. Obvykle se provádí pro hustoty energie menší než je $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Jedná se o dynamický tepelný proces, který má za následek tavení materiálu.



Obr. 24 Režimy laserového svařování [19]

Energie laserového svazku je absorbována povrchem svařovaného materiálu; proto je hloubka penetrace velmi ovlivněna tepelnou vodivostí svařovaného materiálu. Obvykle se provádí pro menší hustoty energie, při kterých dochází k minimálnímu odpařování materiálu a používá se převážně v případech svařování fólií a tenkých plechů, kde požadujeme omezenou hloubku průvaru a rychlost svařování může být vyšší. Na rozdíl od metody keyhole je zde větší tepelně ovlivněná oblast. Tuto metodu lze použít například i pro svařování zcela transparentních plastů, a to za pomoci absorpční látky (např. inkoustu).

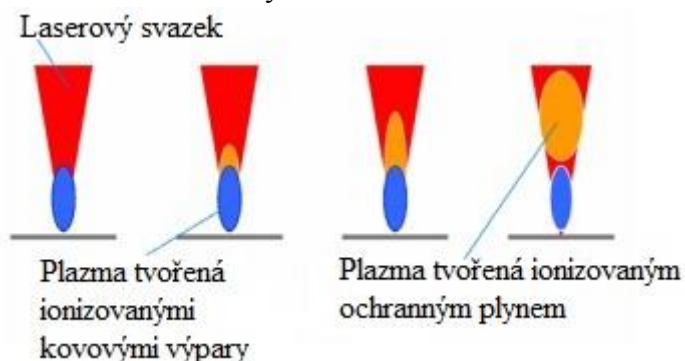
- Penetrační režim - u této metody se využívá vysoké hustoty energie laserového paprsku nad $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, který částečně odpaří materiál spojovaných součástí a vznikne kapilára tvaru klíčové dírky tzv. „keyhole“; proto se tato metoda někde uvádí pod označením keyhole. Při pohybu paprsku během svařování zaplňuje tavenina postupně kapiláru a vzniká úzký a hluboký svar. Kapilára je tvořena plazmatem, kovovými párami a roztaveným materiálem. Tvar kapiláry je při svařování udržován díky rovnováze mezi vzájemným silovým působením taveniny a tlaku kovových par. Metoda je vhodná pro kovové materiály, vzhledem k náročnému udržení stabilní keyhole u plastů.
- Využívá se především při spojování silnějších dílů, u kterých je hlavní požadavek hluboká penetrace. Schematické znázornění svařování touto metodou je na obr. 25.



Obr. 25 Vznik dutiny ve tvaru keyhole [37]

U laserového svařování dochází v kapiláře vlivem ionizace kovových výparů ke vzniku plazmatu. Toto plazma je při svařování laserem vždy přítomné, dosahuje vysokých teplot a je elektricky neutrální ionizované skupenství hmoty. Plazma pohlcuje jen malé množství energie laserového paprsku, a proto nevyvolává znatelně velké změny v šířce a hloubce závaru.

Může vzniknout i plazma ochranného plynu, který se používá při svařování. Tento jev nastává při určité hodnotě hustoty energie nad povrchem materiálu, kde dochází k ionizaci ochranné atmosféry. Tento typ plazmatu pohlcuje podstatně větší část energie laserového paprsku v závislosti na množství (průtoku), typu ochranného plynu a na hustotě energie.



Obr. 26 Tvorba plazmatu při svařování [37]

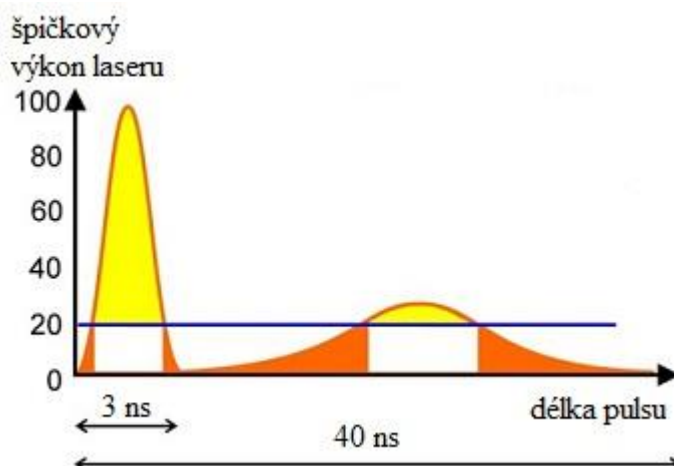
Energie, která je potřebná pro vznik plazmatu a spotřebovává se jeho absorpcí, se nedostane do materiálu a chybí tak při tvorbě kapiláry, vzniklý závar je širší na povrchu materiálu, ale daleko méně pronikne do hloubky. Na obr. 26 je zobrazeno schéma tvorby plazmatu při svařování.

2.2 Operační režimy práce laseru [16],[20],[21],[44]

Hlavním faktorem laseru na působení materiálu je výkon a časové trvání laserového svazku. Laser může mít stejnou vlnovou délku, ale charakteristika svazku může být zcela jiná. Krátká délka pulsu (obr. 27) generuje vyšší výkon laserového svazku a vyšší energii v pulsu. Krátký puls (obr. 27) je chladnější, nezahřívá tak povrch a neničí materiál. Přitom střední výkon laseru je stejný. Základní typy práce laseru a jeho rozdělení jsou:

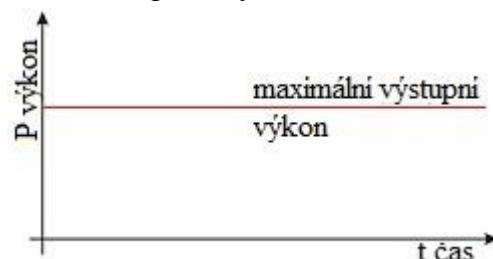
1. kontinuální paprsek laseru
2. pulsní paprsek laseru
3. Q-switch pulsní paprsek

Tyto tři typy práce laseru jsou dále rozepsány a jejich vlastnost graficky znázorněna.



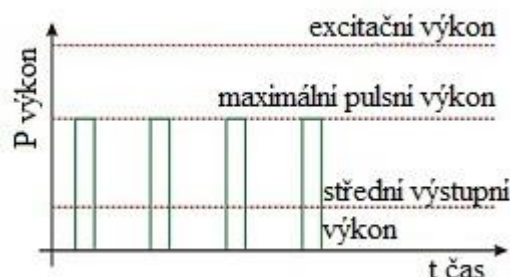
Obr. 27 Obecné znázornění operačního módu [21]

1. Kontinuální režim - bývá označován zkratkou CW, laserový zdroj je buzen kontinuálně, stále a svazek laseru je taky stále emitován (obr. 28).



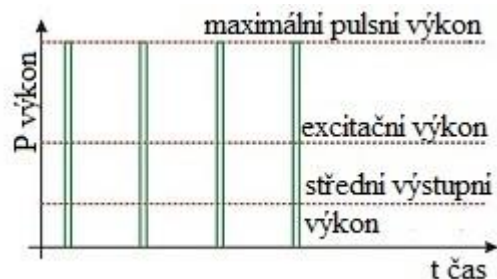
Obr. 28 Grafické znázornění kontinuálního módu [21]

2. Pulsní režim – zkratkou PW, kdy dochází ke vzniku krátkých pulsů (obr. 29), pulsy mají na působení materiálu jiné vlastnosti než CW mód.



Obr. 29 Grafické znázornění pulsního módu [21]

3. Q-switch pulsní paprsek - dochází k přeměně kontinuálního módu na pulsní s vysokou energií díky součástce umístěné v rezonančním obvodu. Součástka zlepšuje kvalitu svazku, a při tomto módu dochází k zvýšení výkonu pulsu (obr. 30) nad hodnotu, která je dána excitačním výkonem.



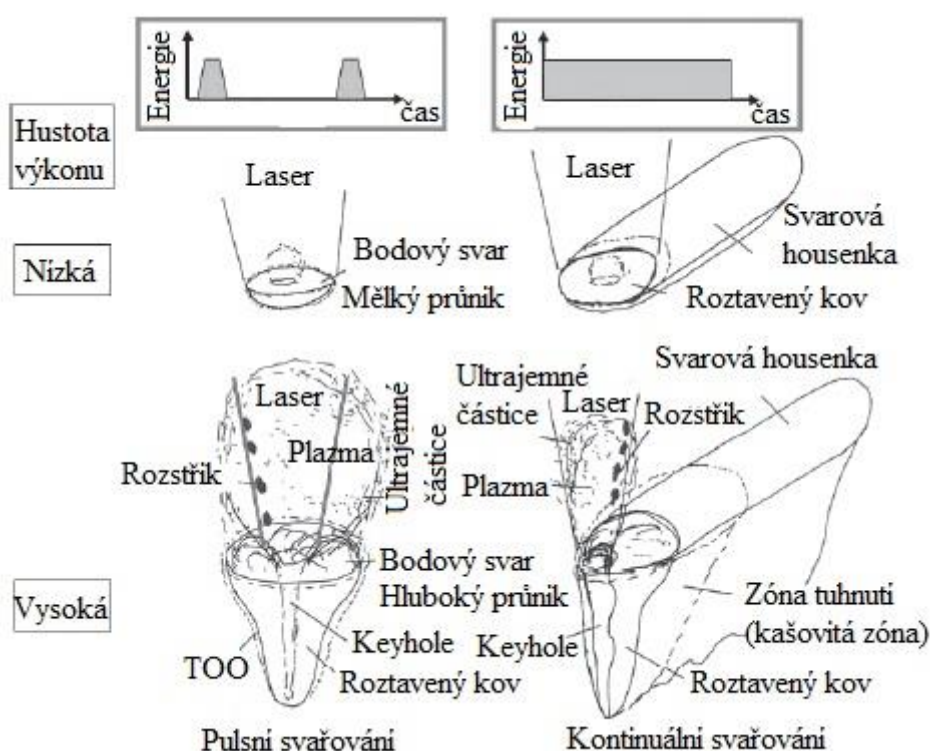
Obr. 30 Grafické znázornění Q-switch [21]

3 SVAROVÉ SPOJE [11],[16],[37]

Konstrukce laserů umožňuje vytvořit svarový spoj dvěma způsoby režimu práce, a to svařováním pulsním (PW), nebo kontinuálním (CW), schémata svařování PW a CW režimem jsou zobrazena na obr. 31.

V případě pulsního režimu se provádí švové nebo bodové svařování, a používá se tam, kde jsou požadavky na dodržení rozměrů svarové lázně s minimálním ovlivněním základního materiálu. Principem pulsního svařování je to, že mezi jednotlivými pulzy dochází k tuhnutí svarové lázně, a to buď k úplnému, nebo částečnému. Používá se při svařování obtížně svažitelných materiálů a tam, kde nelze z důvodu konstrukčního uspořádání svařovaných dílů efektivně použít jinou metodu.

V kontinuálním režimu se provádí svařování průběžných i přerušovaných svarových spojů, generuje se u nich souvislý výstupní výkon. Průběžné svary lze provést i v pulsním režimu, kde se tvoří svar bod po bodu.



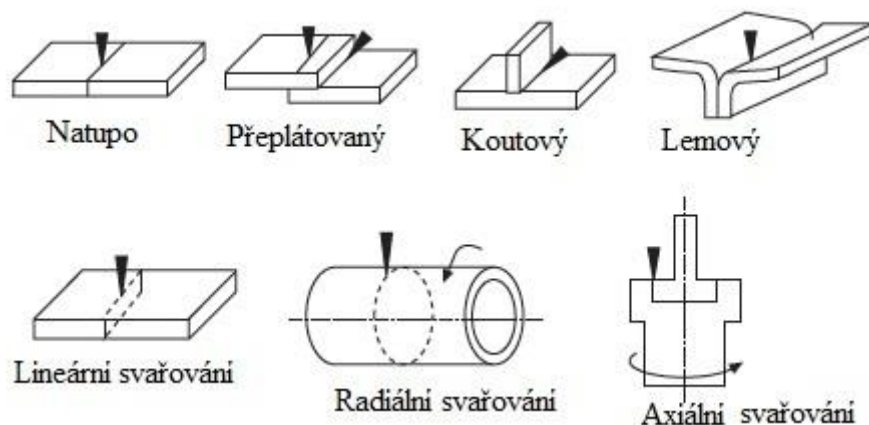
Obr. 31 Zobrazení PW a CW režimů svařování, schéma svarových housenek [16]

Laserem se dají vytvořit téměř všechny základní typy svarových spojů, které se vytvářejí i ostatními technologiemi. Schémata základních spojů jsou zobrazena na obr. 32.

Při svařování spojů natupo se musí dodržovat, aby čela materiálů byla stejně vysoká a v co nejtěsnějším spojení. Pokud je mezi nimi větší mezera, může dojít ke vzniku vrubu.

Při svařování přeplátovaných spojů, kdy jsou materiály položeny nad sebe, je důležitým pravidlem, aby byly materiály v co nejtěsnějším dotyku. Přitom tloušťka a druh materiálu mohou být rozdílné. Laserem lze dosáhnout i toho, že průvar zcela neprojde spodním materiálem, takže spodní strana je povrchově nedotčená, ale jen např. do poloviny tloušťky a navíc dokáže provařit dva i více materiálů položených nad sebe.

Nejsou kladeny požadavky na kvalitu a čistotu povrchu svařovaných materiálů, vzhledem k hustotě výkonu, se jakékoliv nečistoty a vměstky před natavením svarové lázně odpaří.



Obr. 32 Schéma laserem svařovaných spojů [16]

3.1 Vady ve svarech [1],[12],[16]

Obecně se dá říci, že vada výrobku je každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami, případně smluvním vzorkem. Vady výrobků se rozdělují do hlavních skupin:

- Zjevné: jsou to vady zjistitelné vizuálně, pouhým okem, nebo pomůckami
- Skryté: vady, které zjistíme pomocí přístrojů, nebo zkouškami v laboratořích

Dále je to dělení podle ustanovení příslušných předpisů:

- přípustné: vady, které normy, technické podmínky nebo smluvní vzorek dovolují a nemusí se odstraňovat
- nepřípustné: vady, které neodpovídají povoleným hodnotám. Dále se dělí na opravitelné a neopravitelné

Ve svarech se vady musí považovat za nebezpečné koncentrátoři napětí, které zvláště nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy. Za určitých podmínek se mohou stát iniciátory křehkého lomu a mít za následek vyřazení součásti z provozu. V provozu lze připustit jen svary bez vad, nebo jen s takovými typy vad, o kterých víme, že při provozním zatížení neohrozí bezpečnost svařovaných konstrukcí.

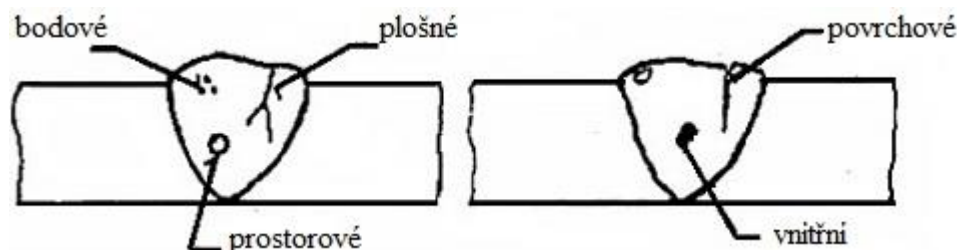
Základní rozdělení vad ve svarech je podle jejich tvaru (geometrie) a podle polohy výskytu ve svaru, obecné zobrazení je znázorněno na obr. 33.

Podle tvaru (geometrie) rozlišujeme ve svarech následující vady:

- plošné: trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, příp. neprůvary, nespojitost návaru se základním materiálem (neprůvar v rovině souběžné s povrchem)
- bodové: mikropóry, případně malé sférické vměstky (např. silikáty)
- prostorové: plynové dutiny (bubliny, póry), vměstky (struskové, tavidlové, oxidické, kovové), staženiny (mezidendritické, kráterové)

Rozdělení podle polohy vad ve svaru:

- povrchové
- vnitřní



Obr. 33 Schéma vad ve svaru [1]


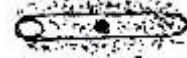



Jednotlivé druhy vad a příčiny jejich vzniku závisí na metodě svařování a druhu svařovaného materiálu. Norma ČSN EN ISO 6520-1 uvádí klasifikaci vad, které se mohou vyskytovat ve svarových spojích při tavném svařování kovů. Norma zařazuje vady do šesti skupin.

Tab. č. 9 Přehled základních skupin vad [1]

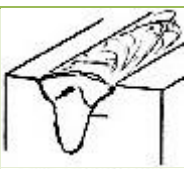



Skupina č.	1	2	3	4	5	6
Název vady	Trhliny	Dutiny	Vměstky	Vady odtavováním a závaru	Vady tvaru	Různé




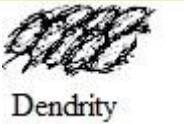
- Deformace a zkroucení při laserovém svařování - v průběhu laserového svařování je materiál vystaven teplotním cyklům nebo průběhům, jako jsou ohřev, tavení, odpařování, tuhnutí a chlazení, což nevyhnutelně vede k objemovým změnám při tepelné roztažnosti a smrštění. Toto způsobí zkroucení nebo deformaci, zbytková pnutí nebo trhliny svaru.
- Přípustnost vad ve svarech - Obecně je přípustnost vad ve výrobcích stanovena druhem, velikostí a četností vyskytujících se vad v závislosti na typu výrobku (svaru) či konstrukce a způsobu jejich namáhání.

Tab. č. 10 Vada geometrického charakteru u laserového svařování [16]

Druh	Zobrazení	Příčiny vzniku
Napjatost a zkroucení		Velký teplotní účinek, nedokonalé upnutí a omezené podmínky
Rozstřík taveniny		Nevhodné svařovací podmínky
Provaření (propálení)		Tenký materiál Velká šířka housenky
Převýšení		Pomalá rychlost svařování a velký počáteční ohřev Vlastnosti zóny tavení (viskozita)
Proláklý svar		Vyvarovat se nízkého výkonu a koncentrovaných podmínek

Tab. č. 11 Vada vnitřního charakteru u laserového svařování [16]

Druh	Zobrazení	Příčiny vzniku
Trhlina Za tepla, za studena V důsledku tuhnutí Kráterová trhlina		Výrobky s nízkým bodem tavení a segregací Velké pnutí/deformace
Porosita Otvory, průduchy		Nevhodné svařovací parametry
Nabobtnání spoje s přeplátováním		Svařování plechů vysokým výkonem Špatné přilnutí (mezery v přeplátované součásti)
Neprovařený kořen Nedostatečné tavení		Vysoká odrazivost a účinky plazmatu

Vměstky oxidy, bubliny, póry		Špatný povrch
Ztráta legovaných složek při odpařování		Těkavé složky a nízká teplota tavení
Makrosegregace		Nedostatečné směšování různých materiálů
Mikrosegregace		Prvky s nízkými koeficienty rozložení Svařování při vysoké rychlosti a nízkém vstupním ohřevu

3.2 Metalografická zkouška [43],[46],[48]

Metalografie se zabývá pozorováním a zkoumáním vnitřní stavby kovů a slitin. Cílem je zviditelnění struktury materiálu, resp. svarových spojů, a následné studium pomocí optického či elektronového mikroskopu.

Umožňuje zjišťovat souvislosti mezi strukturou materiálu a jeho vlastnostmi, sledovat a kontrolovat vlastnosti materiálu při jeho výrobě a zpracování, hledat příčiny vzniku vad materiálu nebo vysvětlit důvod selhání nějakého zařízení.

Patří mezi destruktivní kontrolu svarových spojů a při této zkoušce se hodnocený svarový spoj nebo vzorek poruší. Výsledky pozorování se obvykle dokladují fotografickou reprodukcí.

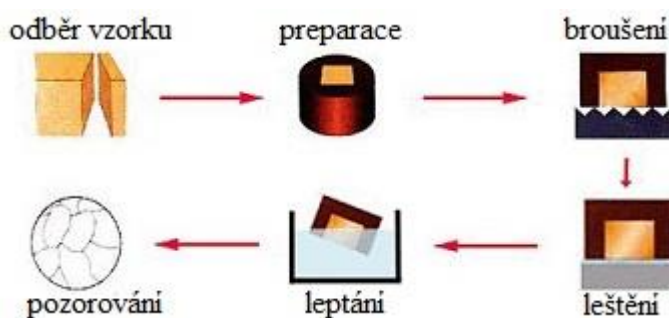
Kovy a slitiny patří mezi materiály neprůhledné, proto k jejich pozorování používáme mikroskopy v režimu odrazu. Nejvyšší odrazivost mají plochy, které jsou dokonale hladké a rovné, cílem je připravit právě takový vzorek.

Vzorky pro svary jsou odebírány příčně k ose svaru (příčný řez), zahrnují tak oblast svarového kovu, tepelně ovlivněnou oblast na obou stranách svaru. Popřípadě se provádí makroskopické kolmé řezy celým svarovým spojem i ovlivněným okolím svaru.

Provádí se různě podle typu vzorku, které mohou být odebrány řezáním, vrtáním, frézováním, rozbrušováním, atd. Uvedené techniky mají ve většině případů vliv na intenzivní vznik tepla při dělení materiálu. Toto teplo může vést ke změně struktury, fázovým transformacím a je nutno na něj brát ohled při volbě způsobu odběru vzorku. Lze mu zamezit se použitím chladicí kapaliny.

Metalografický výbrus, nebo také postup přípravy vzorku pro pozorování, se skládá z několika na sebe navazujících kroků schematicky zobrazených na obr. 34. Postup vyhotovení metalografického vzorku je následující:

- volba místa odběru vzorků
- odběr vzorku
- označení vzorku
- preparace vzorku
 1. za studena
 2. za tepla
- broušení
- leštění
- leptání
 1. plošné
 2. na hranice zrn - selektivní
 3. na makrostrukturu
- hodnocení



Obr. 34 Schematicky zobrazený postup [48]

Metalografické vzorky lze hodnotit makroskopicky nebo mikroskopicky v naleptaném nebo neleptaném stavu. Makroskopická kontrola probíhá pouhým okem nebo při malém zvětšení. Takto se zjišťují vady typu studeného spoje nebo vměstků, spojení jednotlivých housenek a rozsah TOO. Mikroskopická kontrola se provádí pod mikroskopem s velkým zvětšením, lze tak pozorovat jednotlivá zrna, hranice zrn, strukturní složky materiálu svaru a TOO.

3.3 Svařitelnost korozivzdorné oceli [9],[10],[14],[17],[32],[47]

Svařitelností materiálu rozumíme komplexní charakteristiku materiálu, která určuje technickou vhodnost materiálu pro vytvoření spoje požadované jakosti za daných podmínek. Pro zpracování korozivzdorného materiálu je svařitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností. Mezi požadované vlastnosti jako je pevnost a tažnost svarových spojů patří i korozní odolnost svarových spojů. Tepelně ovlivněná oblast musí odpovídat korozní odolnosti základního materiálu. Na kvalitě svarového spoje závisí bezpečnost a životnost celé konstrukce. V praxi je možné velkou většinu těchto ocelí spojovat tavným i odporovým svařováním.

Svařitelnost závisí na řadě činitelů, z toho tři základní jsou:

- materiál (zajímá nás otázka natavení a působilost ke svařování)
- konstrukční hledisko (vhodná volba typu svaru)
- technologická (výběr správné svařovací metody)

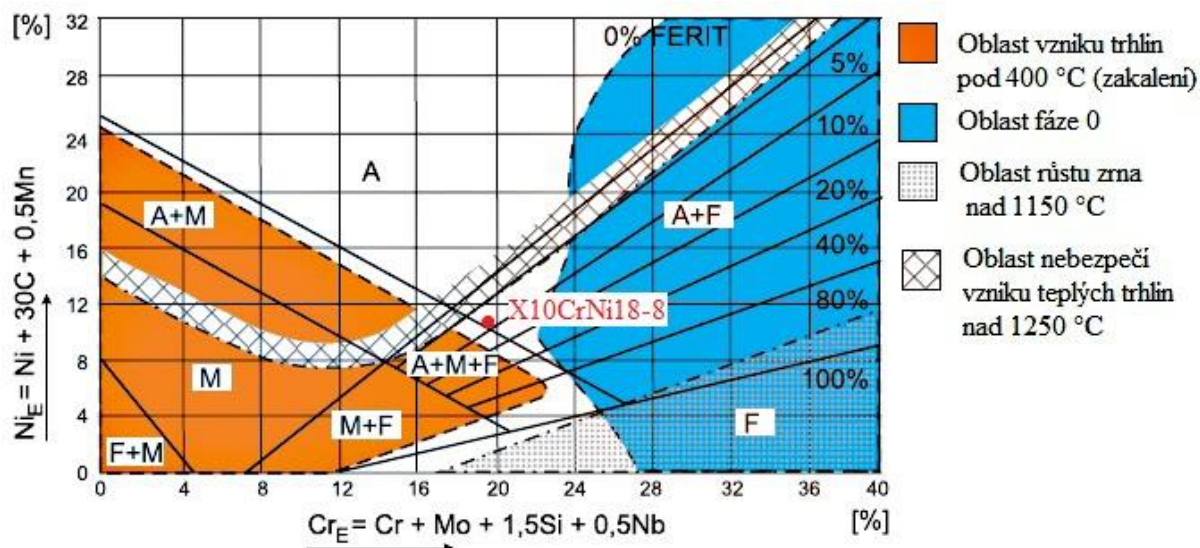
3.3.1 Charakteristika korozivzdorné oceli [9],[14],[17],[47]

Je to vysoce legovaná ocel, která se vyznačuje odolností vůči chemické i elektrochemické korozi. Tato odolnost je dána pasivní vrstvou na povrchu oceli. Korozní odolnost se dále zvyšuje pomocí vyššího obsahu chromu (Cr) a dalších legujících prvků, např. niklu (Ni) a molybdenu (Mo). Je možné ji dolegovávat jinými prvky, které pozitivně ovlivňují další vlastnosti. Patří k nim niob (Nb) a titan (Ti); jsou to prvky zlepšující odolnost vůči mezikrystalové korozi. Dalšími prvky jsou dusík (N), který zvyšuje pevnost a korozní odolnost a síra (S), která zlepšuje obrobitelnost. Korozivzdorné oceli jsou podle obsahu legur a mikrostruktury v tabulce č. 12 rozděleny do čtyř základních skupin.

Tab. č. 12 Rozdělení korozivzdorných ocelí [17]

Struktura	Hlavní legující složky
feritická	Cr
martenzitická	Cr, C nebo Ni
austenitická	Cr, Ni, Mo
austeniticko-feritická	Cr, Ni, Mo (vyšší obsah chromu a nižší obsah niklu než u austenitických ocelí)

Struktura ocelí závisí na chemickém složení a pro určení výsledné struktury se využívá tzv. Schaefflerova diagramu, který je zobrazený na obr. 35. Tento diagram slouží i k posouzení, jaké strukturní změny vyvolá zředění svarového kovu základním materiálem a jaké změny je možné očekávat při svařování. Pracuje na základě chrom-niklového ekvivalentu a podle hodnot těchto ekvivalentů se určuje výsledná struktura. Hlavním představitelem feritotvorného prvku je chrom a hlavním představitelem austenitotvorného prvku je nikl.



Obr. 35 Schaefflerův diagram [10]

Vztahy pro výpočet niklového a chromového ekvivalentu jsou následující:

$$Ni_E = \%Ni + 0,5 \cdot \%Mn + 30 \cdot \%C \quad [hm \, \%] \quad (3.1)$$

kde: Ni [%] – procento obsahu niklu,
Mn [%] – procento obsahu manganu,
C [%] – procento obsahu uhlíku.

$$Cr_E = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \quad [hm \, \%] \quad (3.2)$$

kde: Cr [%] – procento obsahu chromu,
Mo [%] – procento obsahu molybdenu,
Si [%] – procento obsahu křemíku,
Nb [%] – procento obsahu niobu.

- Feritické oceli - Hlavním legujícím prvkem je Cr s obsahem 13-30 % a obsah C je zpravidla pod 0,1 %. Feritické oceli jsou svařitelné, ale nejsou kalitelné a při teplotách nad 900 °C materiál křehne, dochází k poklesu tažnosti a tvorbě hrubého zrna, které není možné ovlivnit tepelným zpracováním, proto by svařování mělo probíhat s co možná nejmenším přívodem tepla. Vzhledem ke snižování tažnosti v okolí svaru nejsou vhodné pro konstrukce vystavované vibracím a střídavému namáhání. Pro vysoké požadavky na odolnost vůči korozi se dává přednost v použití stabilizovaných ocelí Ti a Nb.
- Martenzitické oceli - Obsahují od 12-18 % Cr a obsah C je od 0,1-1 %. Jsou kalitelné, materiál je po kalení křehký, proto obvykle následuje popouštění. Ke křehnutí materiálu může docházet při ohřevu na teplotu 350-550 °C a proto je nutné se tohoto rozmezí vyvarovat. Dalším nebezpečím je křehnutí způsobené vodíkem, které může vzniknout po moření oceli.

Ke svařování jsou vhodné jen podmíněně a zpravidla vyžadují přehřev; martenzitické oceli s vysokým obsahem uhlíku se nesvařují vůbec. Je nutné sledovat náchylnost ke vzniku trhlin za studena. Zlepšení svařitelnosti a lepších mechanických vlastností při zachování vysoké pevnosti se dosahuje legováním Ni a Mb.

- Austenitické oceli - Mají široké spektrum použití, jejich volba bývá nejlepším kompromisem pro další zpracování. Obvykle obsahují méně než 0,1 % C a obsah Cr

se pohybuje v rozmezí od 16-22 %, obsah Ni je 8-40 % a Mb 0-5 %. Mají nízkou mez kluzu zpravidla 230-300 MPa, ale naopak se vyznačují vysokou houževnatostí.

Svařují se snadněji než oceli feritické. Koeficient tepelné roztažnosti je asi o 50 % vyšší a tepelná vodivost je na rozdíl od feritických ocelí zhruba o 60 % nižší; kvůli tomu se teplo více koncentruje do oblasti svařovací zóny. S ohledem na požadavky se stejně dobrá korozní odolnost základního materiálu i svařovaného kovu zajišťuje spojením přídavného materiálu stejného druhu nebo materiálem výšelegovaným. Chemické složení musí být sladěné tak, aby při svařování nedošlo ke vzniku trhlin za tepla. Oceli stabilizované Ti, Nb a oceli se sníženým obsahem C jsou ve svařeném stavu odolné proti mezikrystalové korozi.

- Austeniticko-feritická ocel - Jedná se o oceli označované jako duplexní, obsahují přibližně 50 % feritu a 50 % austenitu. Mají lepší mechanické vlastnosti a vyšší odolnost vůči korozi než většina feritických a austenitických ocelí. Při zvýšených teplotách, mezi 300-1000 °C, dochází ke křehnutí materiálu. Pro svařované konstrukce jsou nejvyšší přípustné provozní teploty 250 °C

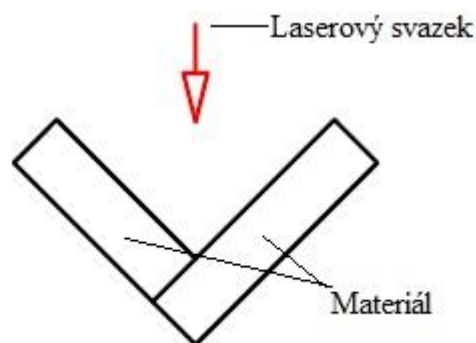
Svařují se velmi dobře a pro svařování je možná volba všech svařovacích metod. Po svaření není nutné aplikovat tepelné zpracování. Avšak od ostatních typů korozivzdorné oceli se svařitelnost trochu liší; jedním z hlavních rozdílů je vyšší viskozita roztaveného svarového kovu, což má za následek to, že svarová lázeň není tak tekutá. Pro svařování s přídavným materiálem se doporučuje zvýšený obsah Ni, který má za úkol snížit obsah feritu ve svarovém kovu.

Použití duplexních ocelí se rozšiřuje a začínají nahrazovat austenitické oceli používané pro různé aplikace v chemickém, jaderném a petrochemickém průmyslu.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Experiment byl proveden na pracovišti Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Pro svařování vzorků z korozivzdorné oceli ČSN 17 241 byl použitý vláknový laser YLS 2000 od společnosti IPG.

Úkolem bylo svařit celkem tři vzorky z korozivzdorné oceli o tloušťce 5 mm a délce 100 mm. Každý vzorek byl rozdělen na 6 úseků, přičemž svařování každého úseku probíhalo rozdílným výkonem laseru a každý vzorek byl svařován jinou rychlostí. Orientace vzorku pro svařování je zobrazena na obr. 36. Na vzorcích proběhla metalografická zkouška, s následným pořízením fotodokumentace, a vyhodnocením geometrie svaru.



Obr. 36 Orientace vzorku

4.1 Charakteristika materiálu v experimentu [8],[35],[45]

Tab. č. 13 Přiřazení označení k použité oceli [45]

ČSN	Značka oceli	Číslo materiálu
17 241	X10CrNi18-8	1.4310

Použitý materiál je jednou z nejpoužívanější korozivzdorných ocelí s austenitickou maticí, která velmi dobře odolává atmosférické korozi a má dobrou korozní odolnost v pasivním a v některých prostředích i v aktivním stavu. Odolnost proti korozi se zvyšuje leštěním povrchu, klesá však zpevněním povrchu při tváření za studena. Obrobitelnost je ztížená, ocel je ale dobře tvárná za tepla i za studena. Je vhodná pro použití na zařízení a součásti v potravinářském, chemickém a kvasném průmyslu, ale jen pro teploty max. 400 °C, použití pro chirurgické nástroje, zubní protézy, zkapalňování vzduchu a součásti zimotvorných zařízení. Je svařitelná běžnými metodami např. elektrickým obloukem nebo plamenem, ale pokud bude svar vystaven silným korozivním vlivům, je zapotřebí celou svařovanou součást austenitizačně vyžítat.

Tab. č. 14 Mechanické vlastnosti materiálu [6]

Pevnost v tahu R_m [MPa]	500-700
Minimální tažnost A [%]	40
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	196

Tab. č. 15 Chemické složení korozivzdorné oceli ČSN 17 241[6],[42]

Chemické složení (rozbor tavby) [%]	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
	max. 0,12	max. 2,00	max. 2,00	16-19	6-9,5	max. 0,045	max. 0,030	< 0,80

Výpočet niklového ekvivalentu dle vztahu (3.1)

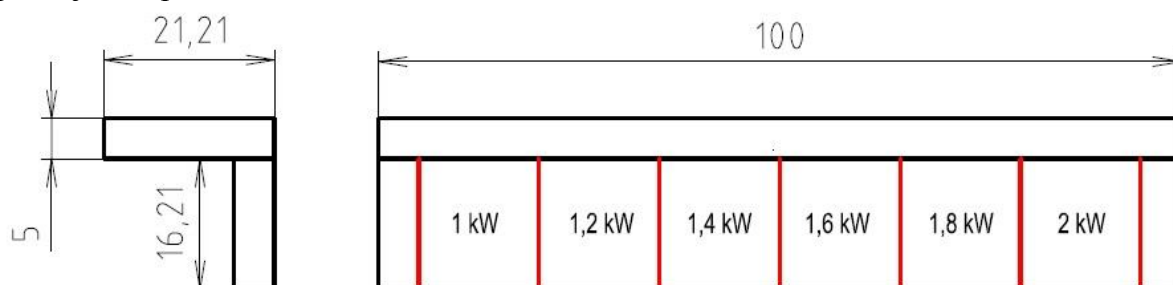
$$Ni_E = \%Ni + 0,5 \cdot \%Mn + 30 \cdot \%C = 7,5 + 0,5 \cdot 1,5 + 30 \cdot 0,10 = 11,25 \text{ hm\%}$$

Výpočet chromového ekvivalentu dle vztahu (3.2)

$$Cr_E = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb = 17,5 + 0,4 + 1,5 \cdot 1,3 = 19,85 \text{ hm\%}$$

4.2 Vzorek

Pro provedení studie byly zapotřebí celkem tři vzorky, na kterých se rozměřily stejné úseky (obr. 37), vzdálenosti se označili popisovacím fixem. Vzorek před realizací svařování neprošel žádnou úpravou ploch materiálu, byl jen na každém okraji spojen bodovým svarem pro zajištění požadovaného tvaru.



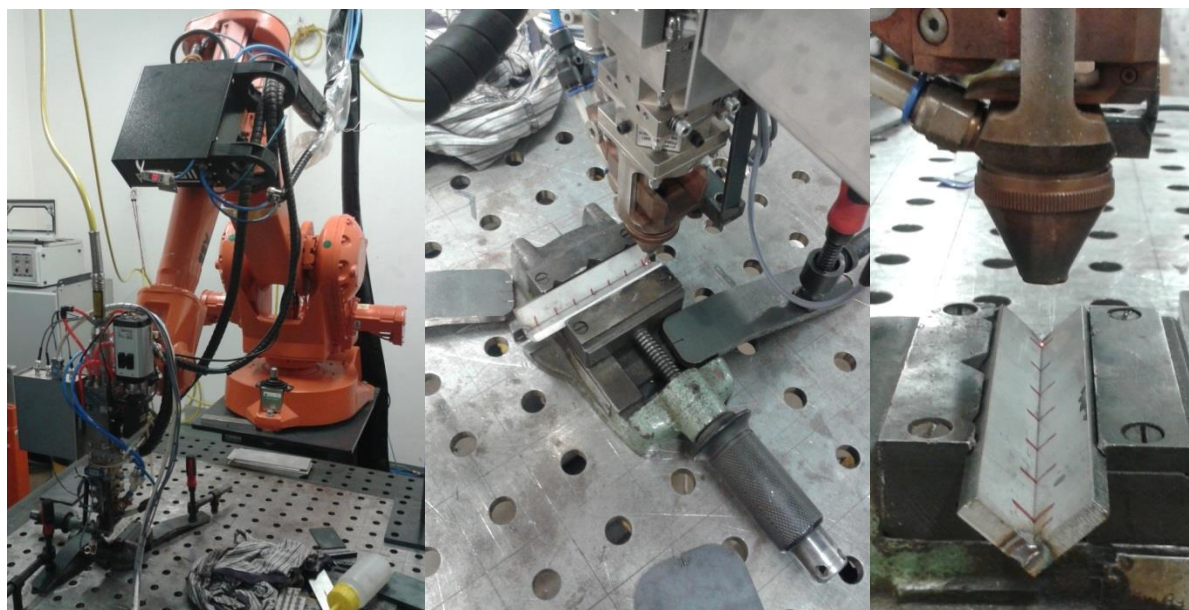
Obr. 37 Rozměření hlavních vzorků

4.3 Příprava a realizace

Připravený vzorek byl uchycen do pracovního prostoru svařovacího robota pomocí upínacího přípravku. Ohnisková vzdálenost je definovaná vzhledem k povrchu materiálu, kladná hodnota je udávána pod povrchem materiálu. Následně bylo provedeno naprogramování dráhy takto upnutého vzorku pomocí zaměřovacího laseru umístěného na svařovací hlavě. Laser je podrobněji zobrazen na obr. 38, kde je vidět i upnutí v pracovním prostoru a v přípravku. Na každém začátku naměřeného úseku se v programu zvolil rozdílný výkon laserového zdroje, a to v rozmezí od 1kW až do 2kW. Po těchto úkonech bylo realizováno svaření. Výsledné svary pro rozdílné rychlosti jsou zobrazeny na obr. 39, svařovací parametry jsou shrnuty v tabulce č. 16.

Tab. č. 16 Svařovací parametry experimentu.

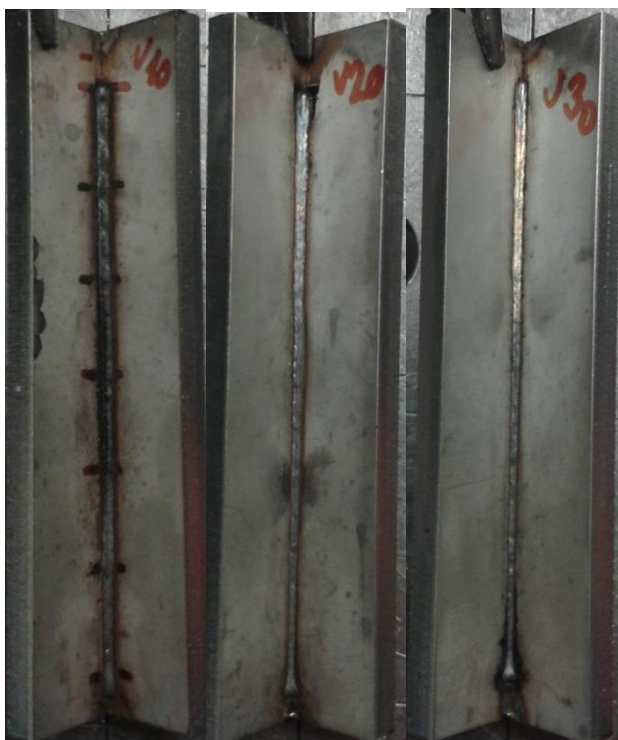
Vzorek	Plyn	Tloušťka [mm]	Poloha ohniska [mm]	Rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]
1	Argon	5	1	10
2	Argon	5	1	20
3	Argon	5	1	30



Obr. 38 Svařovací zařízení a upnutí vzorku v přípravku

Vizuální hodnocení výsledných svarů na vzorcích dle obr. 39 je následující:

- v₁₀ - jedná se o nejpomalejší z provedených svarů, je patrné tepelné ovlivnění v okolí svaru, šířka housenky je zde největší, což je zapříčiněno rychlostí. Samotná šířka housenky se rozšiřuje a to v závislosti na výkonu, a je patrné, že při nejnižším výkonu je užší než při nejvyšším výkonu.
- v₂₀ - svařování střední rychlostí, se šířka svaru opět rozšiřuje od nejmenšího výkonu po největší, opálení v okolí už je skoro nepozorovatelné.
- v₃₀ - nejrychlejší svařování, celková šířka svarové housenky je nejmenší, v závislosti na výkonu se opět rozšiřuje. Tepelné ovlivnění není žádné, svar je hladký a lesklý.



Obr. 39 Výsledné svary na vzorcích

Pro následující realizaci metalografického výbrusu, musel být každý svařený vzorek rozměřen (obr. 41) tak, aby byl řez proveden uprostřed každého úseku jednotlivého výkonu laseru, a to z důvodu zajištění ustáleného výkonu při svařování. Řez byl proveden kolmo k ose svaru tak, aby zahrnoval svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast na každé straně. Nařezání (obr. 40) bylo realizováno pomocí manuální stolní metalografické rozbrušovací pily Struers Labatom-5 (příloha č. 2) umístěné na pracovišti VUT Brno FSI.



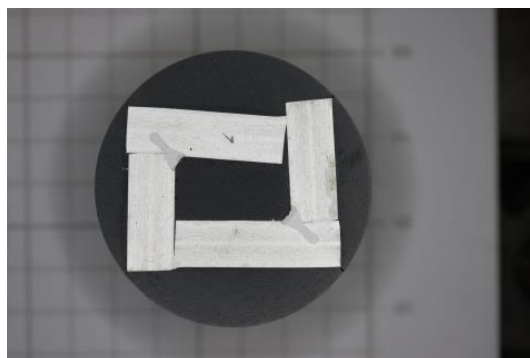
Obr. 40 Nařezané vzorky

Metalografie byla vyhotovena v laboratoři umístěné v ÚPT AVČR, v prvním předběžném návrhu rozměrů vzorku se počítalo s lisováním pouze jednoho výbrusu do pecky, ale kvůli velkému počtu vzorků se provedlo zkrácení stran pomocí laboratorní přesné pily MIKRON 110 (příloha č. 3) tak, aby bylo možno umístit vždy dva vzorky do jedné pecky. Provádělo se lisování za tepla, teplota byla 180 °C, na přístroji Struers CitoPress-1 (příloha č. 6) a následně proběhlo broušení a leštění na zařízení Struers Tegamin-20 (příloha č. 5).

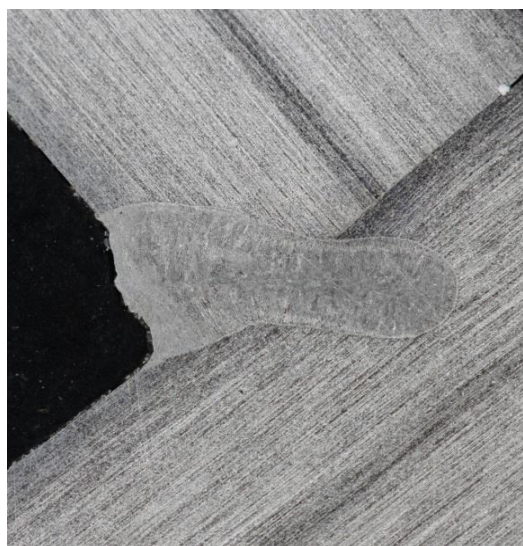
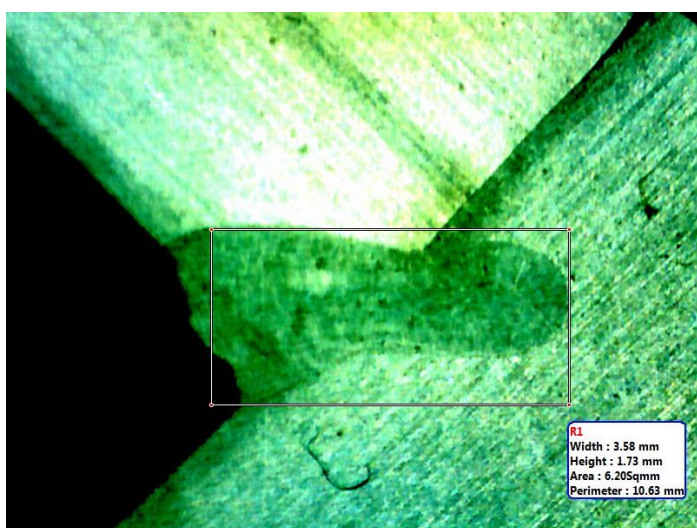


Obr. 41 Rozměření svařených vzorků

Vyhodnocení metalografických vzorků se provedlo pomocí mikroskopu SMZ-168 (příloha č. 4) vybaveného CCD kamerou pro pořízení fotografie a následné zpracování se uskutečnilo v programu Motic images plus 2.0, ve kterém se změřila geometrie svaru. Výsledné hodnoty šířky a hloubky svaru pro jednotlivý výkon se zanesly do tabulky v programu Microsoft Excel a následně se vykreslil graf proložený lineární regresí, která spočítala odchylku jednotlivých hodnot a určila tak přesnost. Na obr. 43 je znázorněné měření v programu Motic detect plus 2.00 a makrosnímek téhož svaru.



Obr. 42 Metalografický vzorek



Obr. 43 Příklad pořízených fotografií svaru rychlostí $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonem $1,4 \text{ kW}$

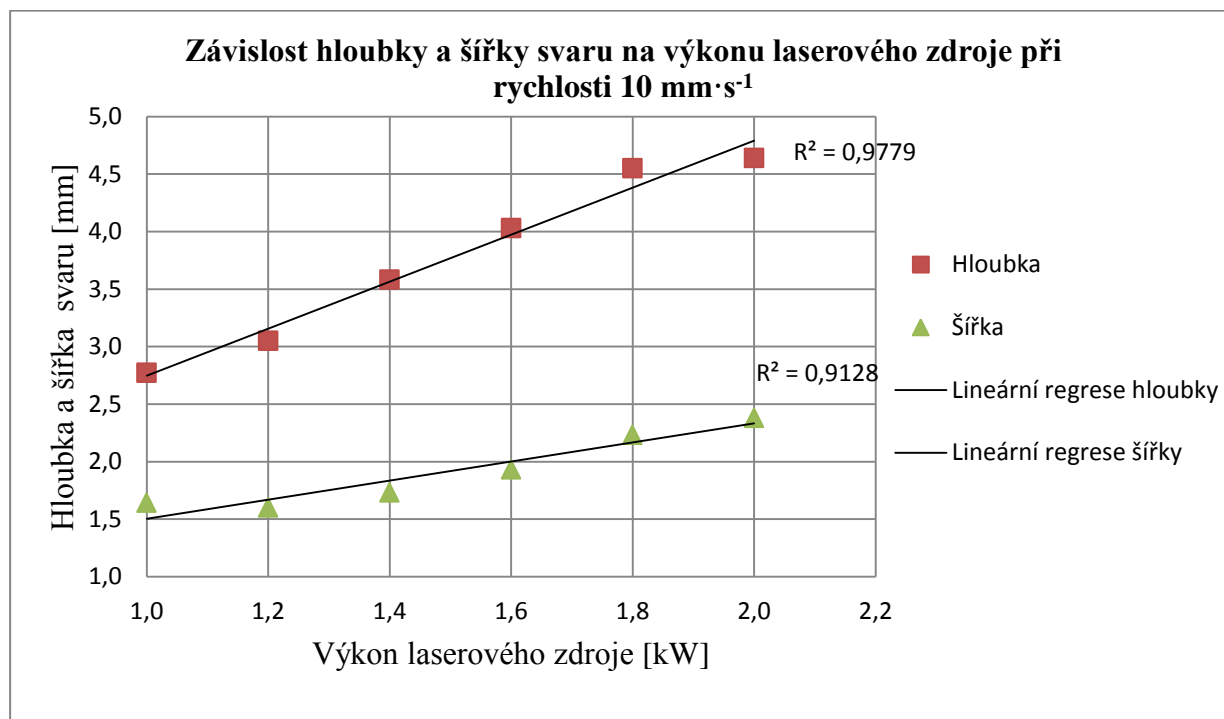
4.4 Hodnocení výsledků

Konfigurace dílů pro koutový spoj není vhodná, lépe by bylo sražení hran pod úhlem 45° tak, aby osa svaru byla v ose spoje. Provedený experiment byl však zaměřen na chování laserového svazku při jeho dopadu do koutového spoje, kdy nastává jiná vazba záření do materiálu než v případě spoje tupého. Vícenásobný odraz v koutu má vliv na geometrii vzniklého svaru, která byla změřena a zaznamenána do tabulek s následným vykreslením grafu. Hodnoty v grafu byly proloženy lineární regresí a automaticky byl vypočítán regresní koeficient R^2 , který nám udává procentuální přesnost hodnot.

Tab. č. 17 Naměřené hodnoty geometrie svaru vzorek č.1

$v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$			
Hloubka [mm]	Šířka [mm]	Výkon [kW]	Vzorek č.
2,77	1,64	1,0	11
3,05	1,60	1,2	12
3,58	1,73	1,4	13
4,03	1,93	1,6	14
4,55	2,23	1,8	15
4,64	2,38	2,0	16

Z naměřených hodnot geometrie na vzorku číslo jedna je patrné, že při svařování rychlostí $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ vznikla nejširší svarová housenka a nejhlubší penetrace do materiálu, která je důsledkem nejnižší rychlosti. Teplo se tak mohlo déle koncentrovat do jednoho místa, než tomu bylo u zbývajících vzorků a tím se materiál více protavil. Pomocí vykresleného grafu a vypočítaného regresního koeficientu R^2 (obr. 44) lze pozorovat, že u hloubky dochází k lineárnímu nárůstu s přesností téměř 97,8 %, ale šířka lineárně narůstá pouze s 91 % přesností, což může mít za následek právě odrazivost laserového svazku v koutovém spoji.

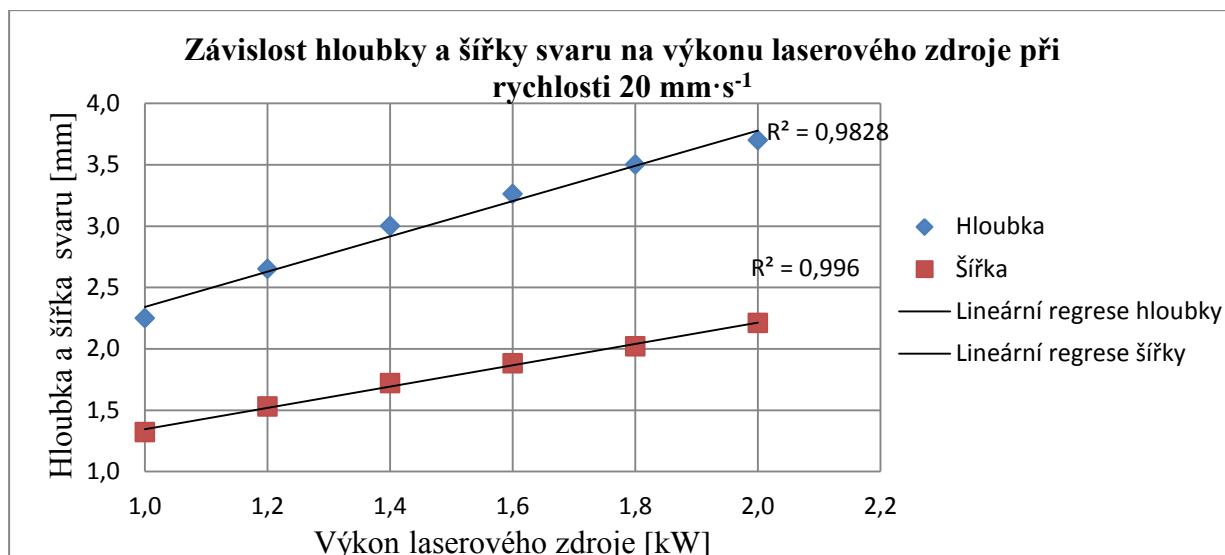


Obr. 44 Závislost geometrie svaru na výkonu laseru pro rychlost $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Tab. č. 18 Naměřené hodnoty geometrie svaru vzorek č.2

$v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$			
Hloubka [mm]	Šířka [mm]	Výkon [kW]	Vzorek č.
2,25	1,32	1,0	21
2,65	1,53	1,2	22
3,00	1,72	1,4	23
3,26	1,88	1,6	24
3,50	2,02	1,8	25
3,70	2,21	2,0	26

Na vzorku číslo dva pro střední svařovací rychlost, kterou jsme použili ($v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), lze z naměřených hodnot pozorovat menší penetraci do materiálu než u vzorku číslo jedna, tj. snížila se hloubka vzniklého svaru, u které dochází k lineárnímu nárůstu (obr. 45) s přesností 98 %, šířka je také menší než u vzorku č. 1 a lineárně narůstá s přesností vyšší, a to 99 %.

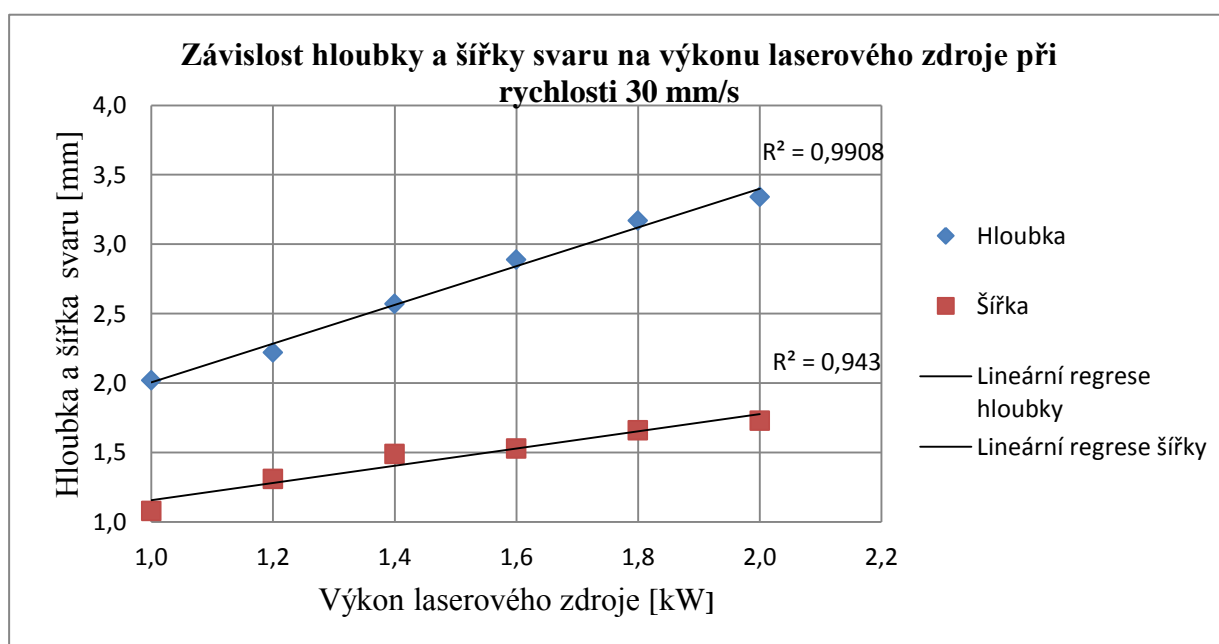


Obr. 45 Závislost geometrie svaru na výkonu laseru pro rychlost $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

V tabulce naměřených hodnot pro vzorek číslo tři, se při rychlosti $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ utvořil nejužší svar, hloubka je nejmenší, což je zapříčiněno právě danou rychlostí. Z hodnot geometrie je patrné, že lineární nárůst hloubky (obr. 46) s přesností 99 % je největší přesnost z těchto tří vzorků, ale nárůst šířky je pouze 94 %.

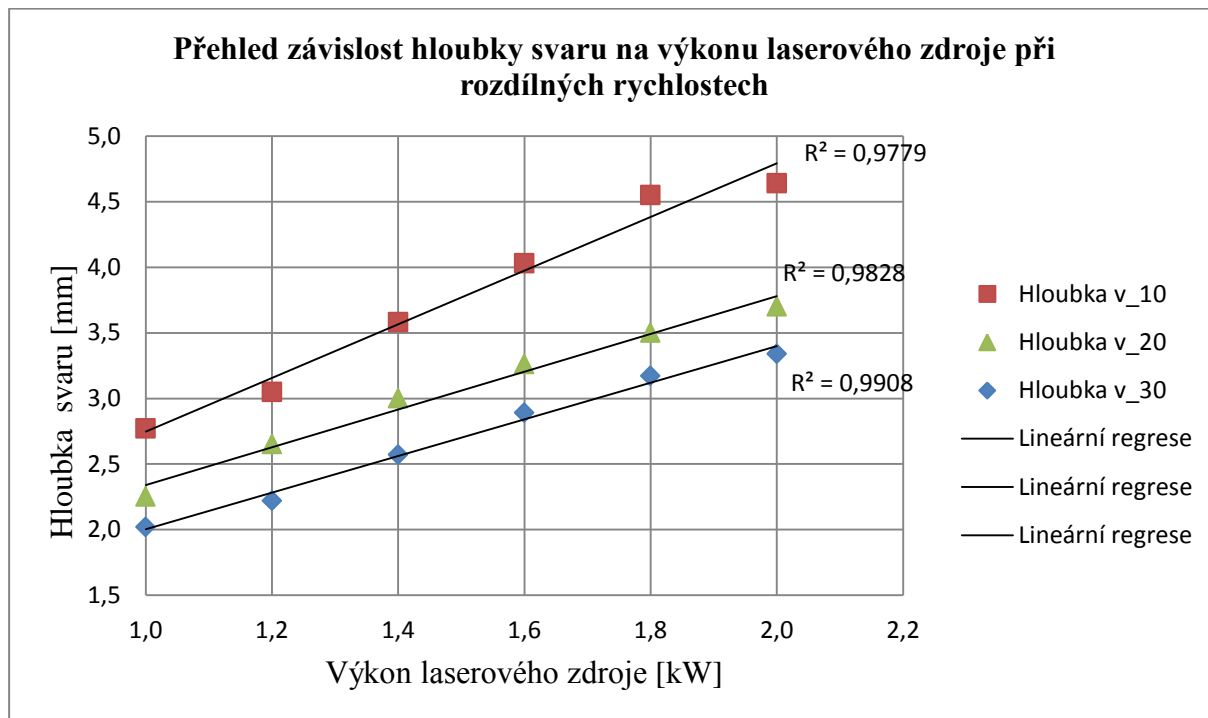
Tab. č. 19 Naměřené hodnoty geometrie svaru vzorek č.3

$v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$			
Hloubka [mm]	Šířka [mm]	Výkon [kW]	Vzorek č.
2,02	1,08	1,0	31
2,22	1,31	1,2	32
2,57	1,49	1,4	33
2,89	1,53	1,6	34
3,17	1,66	1,8	35
3,34	1,73	2,0	36

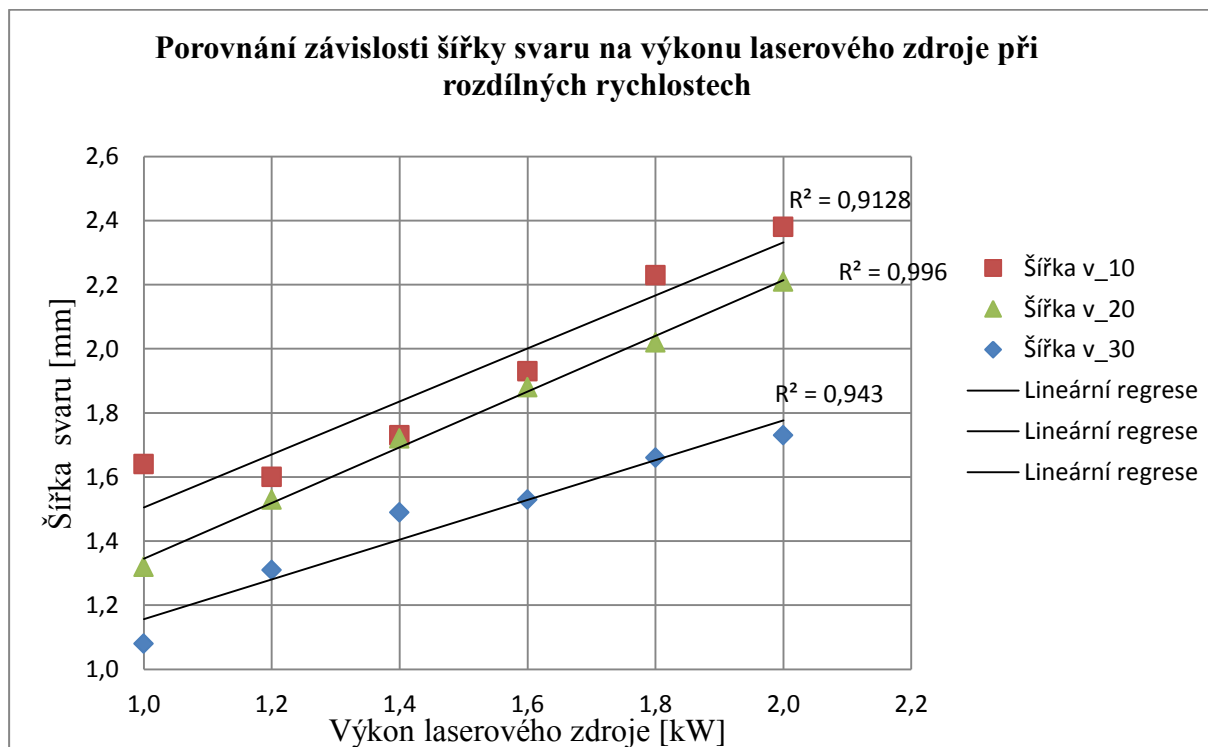


Obr. 46 Závislost geometrie svaru na výkonu laseru pro rychlost $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Pro shrnutí výsledků byly do stejného grafu (obr. 47) a (obr. 48) vykresleny hodnoty hloubky a šířky pro všechny tři vzorky. Zhodnocení je díky tomu přehlednější a lze pozorovat, s jakou přesností dochází k lineárnímu nárůstu hloubky a šířky jednotlivých svarů v závislosti na výkonu laserového zdroje. Z tohoto grafu je patrné, že největší přesnost nárůstu hloubky svarů v závislosti na výkonu laseru, je docílena při nejvyšší použité rychlosti jedná se o 99 % lineární nárůst, ale nejpřesnější nárůst šířky je u svařování rychlostí $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, jedná se také o přesnost 99 %. Díky těmto hodnotám lze říci, že ideální nárůst geometrie by bylo někde mezi rychlostí $20\text{-}30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 47 Graf porovnání vzniklých hloubek svaru pro jednotlivé rychlosti



Obr. 48 Graf porovnání vzniklé šířky svaru pro jednotlivé rychlosti

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [31]

Technicko-ekonomické zhodnocení se bude zabývat určením ceny jednoho metru svaru při rychlostech použitých v experimentu. Budou zde brány v potaz náklady na pořízení stroje, jeho spotřebu elektrické energie, cenu ochranného plynu, stlačeného vzduchu a mzda operátora. Dále se bude započítávat cena spotřebních dílů a servis zařízení, určí se režie a připočítá se zisk 10 %. Výpočty byly provedeny pomocí programu Microsoft Excel a zapsány do tabulky č. 20.

Tab. č. 20 Výpočet ceny hodinového provozu laserového zařízení [31]

50 týdnů/rok		celkem hodin/rok	6000
3 směny		doba odpisů	5 roků
5 dní/týden			
	cena jednotková		
Odpisy	9000000	30000	300
Elektrická energie	2,50/kWh	příkon 10	25
Ochranný argon	160 Kč/m ³	1,2 m ³ /hod	192
Stlačený vzduch	0,5 Kč/m ³	5Nm ³	3
Mzda operátora	180 Kč/hod	32% odvody	238
Spotřební díly	50000 Kč/rok		8
Servis	50000 Kč/rok		8
CELKEM			773
Režie		200%	1547
Zisk		10%	1702

- Vypočítaná cena provozu, uvedené rychlosti,

cena provozu: $1702 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$

rychlost svařování: $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

$20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

$30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

- Přepočet,

cena provozu se vypočítá podílem mezi cenou za jednu hodinu a vydělí se počtem sekund za hodinu:

$$\frac{1702}{3600} = 0,48 \text{ Kč} \cdot \text{s}^{-1} \text{ cena provozu za jednu sekundu je } 0,48 \text{ Kč}$$

rychlost svařování jednoho metru, se vypočítá jako podíl jednoho tisíce milimetrů a rychlostí svařování:

$$\frac{1000}{10} = 100 \text{ s}$$

$$\frac{1000}{20} = 50 \text{ s}$$

$$\frac{1000}{30} = 33,3 \text{ s}$$

- Výpočet ceny pro 1 metr svaru,

cena provozu se vypočítá podílem mezi cenou za jednu hodinu a vydělí se počtem sekund za hodinu:

$$100 \cdot 0,48 = 48 \text{ Kč}$$

$$50 \cdot 0,48 = 24 \text{ Kč}$$

$$33,3 \cdot 0,48 = 15,98 \text{ Kč}$$

Z výpočtu vyplývají ceny zaokrouhlené na celé koruny pro jednotlivé rychlosti, které jsou shrnuty v tabulce č. 21.

Tab. č. 21 Přehled cen svařování

Rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]	10	20	30
Cena za 1 m [Kč]	48	24	16

Náklady na svařování jednoho metru jednotlivými rychlostmi, byly spočítány následovně; pro rychlost $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ stojí 1 m 48 Kč, pro rychlost $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 24 Kč a pro rychlost $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 16 Kč. Cena je ale pouze orientační a pro stanovení přesné ceny by bylo nutné určit přesný odběr elektrického proudu pro jednotlivé výkony laserového zařízení. Příkon, se kterým se počítalo, je pro nejvyšší provoz laseru. Dále by se počítalo s cenou programátora a upínacích přípravků.

6 ZÁVĚRY

V této práci bylo provedeno svařování vzorků z důvodu studie vzniklé geometrie svaru a to bez přídavného materiálu s pomocí vláknového laseru. Svařování proběhlo s rozdílnými parametry, měnila se rychlost svařování pro každý vzorek a při svařování vzorků se měnil výkon postupně od jednoho kilowattu vždy po stejně velkém inkrementu až po nejvyšší výkon, který byl dva kilowatty. Bylo zapotřebí tří zkušebních vzorků, materiál byl korozivzdorná ocel ČSN EN 17 241. Z těchto vzorků bylo získáno celkem osmnáct výbrusů a následným zpracováním bylo zhotoveno devět metalografických vzorků, u kterých byla geometrie vyhodnocena pomocí mikroskopu, programu a následně zpracována do grafů.

Z hodnot regresních koeficientů výsledných grafů vyplývá, že vzniklé změny geometrie (šířka a hloubka) svaru se mění v závislosti na svařovacím výkonu vcelku lineárně. Hloubka svaru je v technické praxi běžný požadavek, změřené výsledky v experimentu lze použít pro nastavení procesních parametrů (svařovacího výkonu a rychlosti), k dosažení vyžadované hloubky svaru.

Některé svary vykazují svarové vady, jedná se o pórovitost, která je zapříčiněná tvorbou keyhole, vlivem značně dynamického procesu. Tato pórovitost je více u hliníkových slitin, ale vzniká i u korozivzdorné oceli. Z pořízených makrofotografií lze usuzovat, že čím větší je rychlost svařování, tím více se pórovitost objevuje. Vnitřní struktura je jinak vyhovující; uprostřed svaru je zrno hrubší a po okrajích jemné.

V technicko-ekonomickém zhodnocení byla odhadnuta cena za jeden metr svaru pro každou rychlost. Jedná se o teoretický odhad, protože během svařování dochází ke změně příkonu a tím i ke změně spotřeby elektrické energie. Cena provozu za hodinu byla zpracována do tabulky a následně byly provedeny výpočty pro jednotlivé rychlosti, ze kterých vyplývá celková cena svařování. Rychlosti $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ stojí 1 m 48 Kč, rychlost $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 24 Kč a rychlost $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 16 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s. ISBN 80-857-7172-1.
2. BOHÁČ, Leoš. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. *Optické sítě* [online]. [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/161.pdf
3. *Centrum laserových a automatizačních technologií: Laserové svařování* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2015-02-08]. Dostupné z: [Dostupné z: http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani](http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani)
4. *Centrum laserových a automatizačních technologií: Rozdělení laserů* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: [Dostupné z: http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru](http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru)
5. ČERNÝ, Václav. Číslo 4/2005 *Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím*. [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271
6. ČSN 41 7241. *Ocel 17 241 Cr-Ni*. 1980. Praha: Český normalizační institut, Praha. Dostupné také z: http://www.technicke-normy-csn.cz/417241-csn-41-7241_4_3459.html
7. DUŠEK, Jiří. Mega-blog. *Lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu*. [online]. 2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
8. *Ferona: Materiálové normy* [online]. 2007. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
9. FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80-857-7163-2.
10. HAJDÍK, Jiří a Michal HEINRICH. 2002. *Svařování vysokolegovaných ocelí: 1.část.: Hadyna* [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Svař.vysoce.leg1_2007.pdf
11. HLAVATÝ, Ivo. *Nekonvenční technologie svařování - laser*. [online]. 2010 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-03--52.pdf>
12. *Hodnocení kvality svarového spoje: Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I*. ČVUT [online]. 2011 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
13. Isotek s.r.o. *Laboratorní přesná pila MIKRON 110* [online]. 2008 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: http://www.isotek.sk/laboratorna_pila.pdf
14. *Italinox: charakteristika materiálu* [online]. 2013. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p1>

15. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
16. KATAYAMA, S. *Handbook of laser welding technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013, xxii, 632 pages. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials, no. 41. ISBN 08-570-9264-2.
17. *Korozivzdorné oceli: vlastnosti* [online]. 2002. Lucembursko: Euro Inox [cit. 2015-04-15]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
18. MMspektrum. In: KOŘÁN, Pavel. *Průmyslové lasery: Laserové řezání* [online]. 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
19. KOŘÁN, Pavel. *Laserové svařování I (laser welding)*. [online]. [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-ilaser-welding-134>
20. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
21. Leonardo technology. *Laser info learning: Operační módy laseru* [online]. 2013 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=17>
22. Leonardo technology. *Laser info learning: Princip vláknového - fiber laseru* [online]. 2013 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=5>
23. Leonardo technology. *Laser info learning: Bezpečnost laseru Class I až Class IV* [online]. 2013 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=6>
24. *Lintech: Co je laserová technologie*. [online]. 2009 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
25. *Lintech: CO2 laser*. [online]. 2009 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co2-laser>
26. *Lintech: diodami čerpaný pevnolátkový krystalový laser Nd:YVO4*. [online]. 2011 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/diodami-cerpany-pevnolatkovy-krystalovy-laser-nd-yvo4>
27. *Lintech: Kontinuální vláknový laser*. [online]. 2011 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/kontinualni-vlaknovy-laser>

28. *Lintech: Laserové svařování kovů* [online]. 2009 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani-kovu>
29. *Lintech: Laserové svařování*. [online]. 2009 [cit. 2015-02-08]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani-b>
30. Maneko spol. s.r.o. *Modelová řada SMZ-168* [online]. 2007 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.maneko.cz/data/Intraco/SMZ%20168.pdf>
31. MRŇA, Libor. *Ekonomika technologií* [přednáška]. Brno: VUT FSI. [online] http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/ekonomika_technologii__mrna.pdf
32. NĚMEC, Josef. *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí*. Praha: SNTL, 1975, 156 s
33. NOVÁK, Miroslav. *LAO - lasery a optika. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení*. [online]. 2011 [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
34. NOVÁK, Miroslav. *Základní přehled průmyslových laserů*. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128#tab_lasery
35. *Novel: materiálové normy* [online]. 2011. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/materialove-normy/#0>
36. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Lasery: Emise a absorpce světla*. [online]. [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
37. ROUBÍČEK, Martin. Air Liquide CZ, s.r.o.: *Laserové svařování*. [online]. [cit. 2015-02-08]. Dostupné z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>
38. Seetech: *Robotized Welding Equipments*. [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://seetech-corp.com/engineering/robotized-welding/>
39. Struers. *Labotom - manuální stolní metalografická rozbrušovací pila: Labotom-15* [online]. 2015 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://ipaper.ipapercms.dk/StruersAS/Labotom15English/>
40. Struers. *Lisy pro zalévání za horka: CitoPress-1* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://ipaper.ipapercms.dk/StruersAS/CitoPress1English/>
41. Struers. *Pokročilé preparační systémy: Tegramin-20* [online]. 2015 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://aiim.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@aiim/documents/doc/uow155171.pdf>

42. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
43. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii*. [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>
44. ŠULC, Jan. PLS Laser systems. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. [online]. 2004 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
45. *Terapol: nerez oceli* [online]. 2005. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-tj-austeniticke>
46. ÚMVI FSI VUT v Brně. *Příprava a hodnocení metalografických vzorků* [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/index.php>
47. VEVERKA, J. *Svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_korozivzdornych_a_zarupevných_oceli.html
48. VŠCHT PRAHA. *Laboratorní práce "Metalografie I.": Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem* [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
A	Tažnost	[%]
Ni _E	Niklový ekvivalent	[hm %]
CW	(Continuous Wave) – Kontinuální režim laseru	
LASER	(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - zesílení světla stimulovanou emisí záření	
Cr _E	Chromový ekvivalent	[hm %]
PW	(Pulse Wave) – Pulsní režim laseru	
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{p0,2}	Mez kluzu	[MPa]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
ÚPT AVČR	Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky	
v ₁₀	Rychlost svařování prvního vzorku	[mm·s ⁻¹]
v ₂₀	Rychlost svařování druhého vzorku	[mm·s ⁻¹]
v ₃₀	Rychlost svařování třetího vzorku	[mm·s ⁻¹]
VUT Brno FSI	Vysoké učení technické Brno Fakulta strojního inženýrství	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařovací robot.....	9
Obr. 2 Využití v průmyslu.....	10
Obr. 3 Srovnání emise záření laseru a běžného tepelného zdroje.....	11
Obr. 4 Základní schéma laseru.....	11
Obr. 5 Činnost optického rezonátoru a vznik stimulované emise.....	12
Obr. 6 Schéma optického vlákna.....	12
Obr. 7 Schéma CO ₂ laseru.....	13
Obr. 8 Princip difúzně chlazeného, radiofrekvenčně buzeného SLAB CO ₂ laseru.....	14
Obr. 9 Schéma průmyslového zařízení CO ₂ laseru.....	14
Obr. 10 Základní princip Nd:YAG laseru.....	15
Obr. 11 Přímé buzení.....	15
Obr. 12 Princip Nd:YAG laseru buzeného přes optické vlákno.....	15
Obr. 13 Schéma průmyslového laseru Nd:YAG a možnosti provedení.....	16
Obr. 14 Schéma diskového laseru.....	17
Obr. 15 Rezonátor vláknového laseru.....	17
Obr. 16 Průřez obalu aktivního vlákna.....	17
Obr. 17 Schéma vláknového laseru.....	17
Obr. 18 Zobrazení přímé přeměny.....	18
Obr. 19 Schéma diodového laseru.....	18
Obr. 20 Schéma laserového svařování – penetrační metoda.....	19
Obr. 21 Schéma geometrie svarů různých metod svařování v závislosti na výkonu.....	20
Obr. 22 Závislost absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce.....	21
Obr. 23 Chování svazku při dopadu.....	21
Obr. 24 Režimy laserového svařování.....	21
Obr. 25 Vznik dutiny ve tvaru key hole.....	22
Obr. 26 Tvorba plazmatu při svařování.....	22
Obr. 27 Obecné znázornění operačního módu.....	23
Obr. 28 Grafické znázornění kontinuálního módu.....	23
Obr. 29 Grafické znázornění pulsního módu.....	23
Obr. 30 Grafické znázornění Q-switch.....	23
Obr. 31 Zobrazení PW a CW režimů svařování, schéma svarových housenek.....	24
Obr. 32 Schéma laserem svařovaných spojů.....	25
Obr. 33 Schéma vad ve svaru.....	25
Obr. 34 Schematicky zobrazený postup.....	27
Obr. 35 Schaefflerův diagram.....	29
Obr. 36 Orientace vzorku.....	30
Obr. 37 Rozměření hlavních vzorků.....	32
Obr. 38 Svařovací zařízení a upnutí vzorku v přípravku.....	32
Obr. 39 Výsledné svary na vzorcích.....	33
Obr. 40 Nařezané vzorky.....	33
Obr. 41 Rozměření svařených vzorků.....	33
Obr. 42 Metalografický vzorek.....	34
Obr. 43 Příklad pořízených fotografií svaru rychlostí 10 mm·s ⁻¹ a výkonem 1,4 kW.....	34
Obr. 44 Závislost geometrie svaru na výkonu laseru pro rychlost 10 mm·s ⁻¹	35
Obr. 45 Závislost geometrie svaru na výkonu laseru pro rychlost 20 mm·s ⁻¹	36
Obr. 46 Závislost geometrie svaru na výkonu laseru pro rychlost 30 mm·s ⁻¹	36
Obr. 47 Graf porovnání vzniklých hloubek svaru pro jednotlivé rychlosti.....	37
Obr. 48 Graf porovnání vzniklé šířky svaru pro jednotlivé rychlosti.....	37

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Přehled průmyslových laserů.....	13
Tab. č. 2 Podrobný přehled vlastností CO ₂ laseru.....	14
Tab. č. 3 Přehled výhod a nevýhod laseru podle typu buzení.....	16
Tab. č. 4 Podrobný přehled vlastností Nd:YAG laseru.....	16
Tab. č. 5 Podrobný přehled vlastností Yb:YAG laseru.....	17
Tab. č. 6 Podrobný přehled vlastností vláknového laseru.....	18
Tab. č. 7 Podrobný přehled vlastností vláknového laseru.....	18
Tab. č. 8 Porovnání metod svařování.....	19
Tab. č. 9 Přehled základních skupin vad.....	26
Tab. č. 10 Vada geometrického charakteru u laserového svařování.....	26
Tab. č. 11 Vada vnitřního charakteru u laserového svařování.....	26
Tab. č. 12 Rozdělení korozivzdorných ocelí.....	28
Tab. č. 13 Přiřazení označení k použité oceli.....	31
Tab. č. 14 Mechanické vlastnosti materiálu.....	31
Tab. č. 15 Chemické složení korozivzdorné oceli ČSN 17 241.....	31
Tab. č. 16 Svařovací parametry experimentu.....	32
Tab. č. 17 Naměřené hodnoty geometrie svaru vzorek č. 1.....	34
Tab. č. 18 Naměřené hodnoty geometrie svaru vzorek č. 2.....	35
Tab. č. 19 Naměřené hodnoty geometrie svaru vzorek č. 3.....	36
Tab. č. 20 Výpočet ceny hodinového provozu laserového zařízení.....	38
Tab. č. 21 Přehled cen svařování.....	39

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Tabulka výsledných svarů pro jednotlivé procesní parametry

Příloha č. 2 Parametry Struers Labatom-5



















Příloha č. 3 Parametry MIKRON 110

Příloha č. 4 Parametry SMZ-168

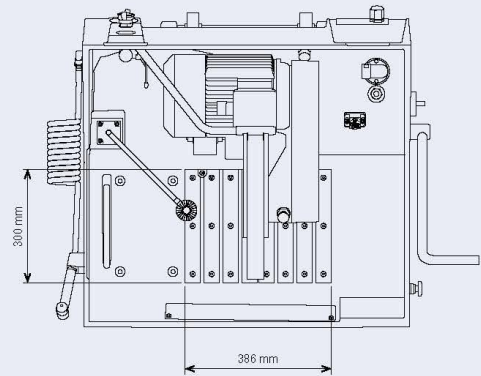
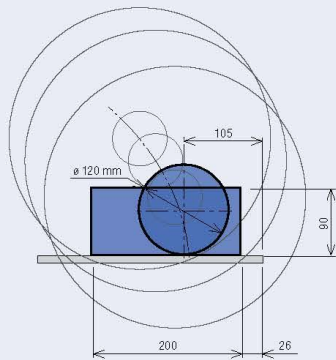
Příloha č. 5 Parametry Struers Tegamin-20

Příloha č. 6 Parametry Struers CitoPress-1

Příloha č. 1

Výkon [kW]	Rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]		
	10	20	30
1			
1,2			
1,4			
1,6			
1,8			
2			

CUTTING SPECIFICATIONS - Labotom-15



TECHNICAL DATA

Cut-off wheel

Size	350 mm / 14" dia. (300 mm / 12" dia.)
Arbor size	32 mm / 1.26" dia.
Rotational speed (running idle)	2350 rpm
Cutting capacity	120 mm dia. / 4.7" dia. or 90 x 200 mm / 3.5" x 8"

Cutting table

Width	300 mm / 11.8"
Length	386 mm / 15.2"
T-slots	10 mm

Cutting motor

Voltages	Nominal load S1	Intermittent S3 (15 %)	Fuse
3 x 200 V / 50 Hz	5.2 kW / 7.0 HP	7.5 kW / 10 HP	50 A
3 x 200 - 210 V / 60 Hz	6.3 kW / 8.3 HP	8.5 kW / 11.4 HP	50 A
3 x 220 - 230 V / 50 Hz	5.2 kW / 7.0 HP	7.5 kW / 10 HP	50 A
3 x 220 - 240 V / 60 Hz	6.3 kW / 8.3 HP	8.5 kW / 11.4 HP	50 A
3 x 380 - 415 V / 50 Hz	5.2 kW / 7.0 HP	7.5 kW / 10 HP	40 A
3 x 460 - 480 V / 60 Hz	6.3 kW / 8.3 HP	8.5 kW / 11.4 HP	40 A

Dimensions

Width	870 mm / 34.3"
Width with handle	1086 mm / 42.8"
Depth	877 mm / 34.5"
Height	660 mm / 26"
Height, open cover	1045 mm / 41.1"
Weight	180 kg / 397 lbs

Noise level	70 dBA, at idle running, at a distance 1.0 m / 39.4"
-------------	--

Surrounding temperature	5 - 40 °C / 41-104 °F
-------------------------	-----------------------

Humidity	0 - 95 % RH, non condensing
----------	-----------------------------

Safety	Please refer to the Declaration of Conformity
--------	---

SPECIFICATIONS

Manual cut-off machine. Motor power 5.2 / 6.3 kW (7.0 / 8.3 HP). For 350 mm (14") dia. cut-off wheels. 10 mm T-slots cutting table.

Recirculation cooling unit (057667xx), quick-clamping device (05876909), vertical quick clamping device (05876933), spring clamp (05136903) and vertical clamping system (05116905), respectively, are ordered separately.

Optional table unit (06266101) can be used.

Cat. no:	Voltage
06056129	3 x 200 V / 50 Hz
06056130	3 x 200-210 V / 60 Hz
06056135	3 x 220-230 V / 50 Hz
06056136	3 x 220-240 V / 60 Hz
06056146	3 x 380-415 V / 50 Hz
06056154	3 x 460-480 V / 60 Hz

Laboratorní přesná pila MIKRON 110



[kliknutím zvětšit](#)

Základní technické parametry:	
Rozměry:	šířka 550 mm, délka 630 mm, výška 500 mm
Hmotnost:	42 kg bez chladicí kapaliny
Průměr kotouče:	150 mm, max. 160 mm
Otáčky:	500 - 4000 ot/min, plynule
Napájení:	32/24 V, 435 W
Hlučnost:	45 dB

Přístroj umožňuje precizní a rychlé dělení vzorků bez tepelného ovlivnění okolí řezu. Odpadá hrubé broušení povrchu, zkracuje se celková doba přípravy a obsluha má spolehlivou jistotu, že povrch řezu není mechanicky ani tepelně zmožděný.

Bohatě proskleným krytem z bezpečnostního polykarbonátu lze dobře sledovat dělený materiál během řezání. Vzorek lze navíc osvětlit studeným světlem LED na ohebném vodiči. Velké otevření krytu pak umožňuje dobrou dostupnost ke svěráku ze všech stran a snadné čištění přístroje.

Pila má cirkulační chlazení a vestavěnou nádrž na chladicí emulzi. Výkonné čerpadlo jednak dobře chladí řez dvanácti tryskami, a také po skončení práce ho lze přepnout na čištění pracovního prostoru.

Pohodlné ovládání Vám bude vždy přinášet radost z přesného a citlivého řezání. Záruční doba 24 měsíců.

Laboratorní přesná pila MIKRON 110

Použití

Motto: "Nejvíce chyb vzniká již na samém začátku"

Touto pilou určitě vzorek nepoškodíte. Limitovaná spotřeba energie a řada ochranných prvků Vám to prostě ani neumožní. Nekompromisní kvalita řezu výrazně zkracuje dobu přípravy, protože po řezání již není potřebné hrubé broušení. Pila je určena pro přesné a čisté řezy všech kovových i nekovových materiálů včetně keramiky, skla a plastů. Díky intenzivnímu chlazení a mimořádné kvalitě řezu je tato pila vhodná zejména pro přípravu metalografických vzorků.

Vyvážené rameno

Přesné a citlivé řezání zaručuje originální MTH konstrukce vyváženého kyvného ramene. Rameno má ovládací páku, vestavěný pohon a litinové protizávaží, které výborně tlumí chvění. Celý systém o hmotnosti přes 15 kg je vyvážený v každé poloze.

Na ovládací páce lze plynule nastavit přítlak již od 0,5 N, který dokáže rovnoměrně pohybovat s tímto ramenem a zajižďet tak citlivě do řezu. Ve spodní poloze je koncový spínač, který pilu po doříznutí automaticky vypne. Dlouhá páka umožňuje pohodlné řezání volnou rukou, nebo ji lze aretovat v libovolné poloze pro řezání podélným posuvem.

Elektronika

Elektronická výbava obsahuje:



Modelová řada SMZ - 168

Mikroskopy této modelové řady poskytují transfokační poměr 1:6.7 s vynikajícím optickým rozlišením, zvláště velkou pracovní vzdáleností a nepřekonatelnou hloubkou ostrosti, stejně tak jako mimořádně velkou a komfortní pracovní plochu.



SMZ – 168 BL
Binokulární verze



SMZ – 168 TL
Trinokulární verze



SMZ – 168 BL (60)
Binokulární verze
s úhlem vzhledu 60°

Optický systém

- ❖ Stereoskopický obraz s vysokým rozlišením
- ❖ Možnost aretace zvolené hodnoty zoomu
- ❖ Standardní úhel vzhledu 35°
- ❖ Model SMZ-168 BL (60) nabízí úhel vzhledu 60°
- ❖ Dioptrické doostření obou okulárových tubusů: $\pm 5D$
- ❖ Nastavitelný oční rozestup v rozsahu 52mm – 75mm
- ❖ Rozsah zoomu 0.75x – 5x
- ❖ Transfokační poměr 1:6.7
- ❖ Pracovní vzdálenost: 113 mm
- ❖ Protiplíšňová ochrana

Doplňky na vyžádání

- ❖ Temné pole s irisovou clonou
- ❖ Demopolarizační zařízení (nezávislý 360° analyzátor i 360° polarizátor)
- ❖ Polarizační sada (360° analyzátor, polarizátor s upevněním na tělo)
- ❖ Okuláry s rozmanitými měřicími motivy
- ❖ Předšádkové objektivy (0.3x až 2.0x)
- ❖ Řada okulárů (WF 6.25x/23mm až WF 32x/8mm)

Okuláry

- ❖ Širokoúhlé okuláry 10x/23 mm

Stativ

- ❖ Moderní aerodynamický tvar
- ❖ Zvláště velká pracovní plocha
- ❖ Procházející světlo: Halogenová žárovka 12V/10W
- ❖ plynulá regulace intenzity
- ❖ Standardní napájení 220V

Zaostřovací jednotka

- ❖ Ložiskový zaostřovací mechanismus
- ❖ Rozsah zaostření 50mm
- ❖ Průměr oka pro hlavici 76mm
- ❖ Dopadající světlo: Halogenová žárovka 12V/10W

Model SMZ 168 TL
v kompletaci se CCD kamerou



Příloha č. 5 [41]

Technical data		Tegamin-20	Tegamin-25	Tegamin-30
Disc	Diameter	200 mm / 8"	250 mm / 10"	300 mm / 12"
	Speed	40-600 rpm, variable in steps of 10		
	Rotational direction	Counter-clockwise		
	Motor power continuous / max	370 / 555 W / 0.5 / 0.75 HP	750 / 1125 W / 1.0 / 1.5 HP	
	Torque at disc Cont. at <300 rpm Cont. at 600 rpm Max	11.8 Nm / 8.7 ft-lbf 5.9 Nm / 4.4 ft-lbf > 18 Nm / 13.3 ft-lbf	23.8 Nm / 17.6 ft-lbf 11.9 Nm / 8.8 ft-lbf > 40 Nm / 29.6 ft-lbf	
Head	Speed	50-150 rpm, variable in steps of 10		
	Rotational direction	Clockwise, counter-clockwise		
	Force	Individual specimens: 5-50 N	Specimen holder: 30-300 N Individual specimens: 5-50 N	Specimen holder: 30-400 N Individual specimens: 5-65 N
	Motor	120 W		160 W
	Torque	7.5 Nm / 5.6 ft-lbf		10.2 Nm / 7.6 ft-lbf
Software and electronics	Controls	Touch pad and turn/push knob		
	Memory	FLASH-ROM / RAM / NV-RAM		
	LC Display	TFT-colour 320x240 dots with LED back light		
Safety	Please refer to the Declaration of Conformity			
Stop Mechanisms Designed to comply with:	Emergency stop	EN60204-1, Stop Category 0 EN954-1, Category 2		
	Cover	EN60204-1, Stop Category 2 EN954-1, Category B		
Noise level	At idle running, at a distance 1.0 m / 39.4" from the machine	47 dBA		
	During preparation	Polishing 54 dBA, Grinding 56 dBA		
Surrounding temperature	5-40°C / 41-104°F			
Humidity	Non condensing 0-95% RH			
Supply	Voltage / frequency	200-240 V / 50-60 Hz		
	Power inlet	1-phase (N+L1+PE) or 2-phase (L1+L2+PE) The electrical installation must comply with "Installation Category II".		
	Power, nominal load	680 W	1060 W	
	Power, idle	9 W	13 W	
	Current, nom.	3.4 A	5.3 A	
	Current, max.	6.3 A	10 A	
	Pressure for tap water	1-10 bar / 14.5-145 psi		
	Water inlet	13 mm or 19 mm / ½" or ¾"		
	Water outlet	ø30 mm / 1¼"	ø40 mm / 1½"	
	Air inlet	ø6 mm / ¼"		
"Exhaust" (with Cover only)	Air pressure	6-10 bar / 86-145 psi		
	Air quality	The air supplied must be of Class-3 or better, as specified in ISO 8573-1.		
	Dimension	ø50 mm / 2" Recommended capacity for exhaust system: 180m³/h at 0mm water gauge.		
Dimensions and weight (without Cover)	Width	60 cm / 23.6"	67.5 cm / 26.6"	
	Depth	65 cm / 25.6"	75 cm / 29.5"	
	Height	48 cm / 18.9"	56 cm / 22"	
	Weight	52.5 kg / 116 lbs	90 kg / 198 lb	
Dimensions and weight (with Cover)	Width	60 cm / 23.6"	67.5 cm / 26.6"	
	Depth	65 cm / 25.6"	75 cm / 29.5"	
	Height (cover closed/open)	50 cm / 19.7" / 85 cm / 33.5"	58.2 cm / 22.9" / 90 cm / 35.4"	
	Weight	58 kg / 128 lbs	98 kg / 216 lb	

Struers' equipment is in conformity with the provisions of the applicable International Directives and their appurtenant Standards (please contact your local supplier for details).

Struers' products are subject to constant product development. Therefore, we reserve the right to introduce changes in our products without notice.

Struers' equipment is in conformity with the provisions of the applicable International Directives and their appurtenant Standards (please contact your local supplier for details).

Struers' products are subject to constant product development. Therefore, we reserve the right to introduce changes in our products without notice.

Příloha č. 6 [40]

Technical data

SUBJECT	SPECIFICATION
Mounting unit	
Mounting dia.	25, 30, 40, 50 mm, 1¼", 1½"
Mounting press	
Mounting parameters	
Pressure	50-350 bar / 725-5076 psi in steps of 25 bar / 363 psi
Heating time	1-15 min in steps of 0.5 min
Heating temperature	120-150-180°C / 248-302-356°F
Cooling time	1-15 min in steps of 0.5 min
Cooling rate	High: Full flow Medium: 20% of full flow Low: 3% of full flow
Software and electronics	
Controls	Touch pads
LCD display with white LED backlight	160x240 dots
Noise levels	
Idle	0 dB (A)
Max.	63 dB(A)
Working environment	
Temperature, operational	5-40°C / 41-104°F
Humidity, non-condensing	0-95% RH
Supply	
Voltage / frequency	100-120V / 50-60Hz, 200-240V / 50-60Hz Auto detection and auto switch over
Power inlet (IEC320-C13)	1-phase (N+L+PE) or 2-phase (L1+L2+PE) <i>The electrical installation must comply with "Installation Category II"</i>
Power, idle	8W
Power, max.	1300W@100-120V / 1300W@200-240V
Current, max.	13A@100-120V / 5.6A@200-240V
Water pressure (tap water)	1-10 bar / 14.5-145 psi
Water inlet	10 mm / ¾"
Water outlet	ø13 mm
Dimensions and weight	
Width	480 mm / 19"
Depth	560 mm / 22"
Height	440 mm / 17½"
Weight	34 kg / 75 lbs

Struers' equipment is in conformity with the provisions of the applicable International Directives and their appurtenant Standards. (Please contact your local supplier for details)

Struers' products are subject to constant product development. Therefore, we reserve the right to introduce changes in our products without notice



Struers A/S
Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
Phone +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

AUSTRALIA & NEW ZEALAND

Struers Australia
27 Mayneview Street
Milton QLD 4064
Australia
Phone +61 7 3512 9600
Fax +61 7 3369 8200
info.au@struers.dk

BELGIQUE (Wallonie)
Struers S. A. S.
370, rue du Marché Rollay
F- 94507 Champigny
sur Marne Cedex
Téléphone +33 1 5509 1430
Télécopie +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

BELGIUM (Flanders)
Struers GmbH Nederland
Elektroweg 5
3144 CB Maassluis
Telefoon +31 (0) 599 7209
Fax +31 (0) 599 7201
netherlands@struers.de

CANADA
Struers Ltd.
7275 West Credit Avenue
Mississauga, Ontario L5N 5M9
Phone +1 905-814-8955
Fax +1 905-814-1440
info@struers.com

CHINA
Struers Ltd.
No. 1698 Zhang Hong Road
Zhang Jiang Hi-Tech Park
Shanghai 201203, P.R. China
Phone +86 (21) 6035 3900
Fax +86 (21) 6035 3999
struers@struers.cn

CZECH REPUBLIC
Struers GmbH
Organizační složka
Havlíčkova 361
CZ-252 63 Roztoky u Prahy
Phone +420 233 312 625
Fax +420 233 312 640
czechrepublic@struers.de

DEUTSCHLAND
Struers GmbH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 5
D-47877 Willich
Telefon +49 (0) 2154 496-0
Fax +49 (0) 2154 496-222
verkauf@struers.de

FRANCE
Struers S. A. S.
370, rue du Marché Rollay
F-94507 Champigny
sur Marne Cedex
Téléphone +33 1 5509 1430
Télécopie +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

HUNGARY
Struers GmbH
Magyarország Fióktelep
Tatai ut 53
2821 Gyermely
Phone +36 (34) 880546
Fax +36 (34) 880547
hungary@struers.de

IRELAND
Struers Ltd.
Unit 11 Evolution @ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel. +44 0845 604 6664
Fax +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

ITALY
Struers Italia
Via Monte Grappa 80/4
20020 Arese (MI)
Phone +39-02/38236281
Fax +39-02/38236274
struers.it@struers.it

JAPAN

Marumoto Struers K.K.
Takara 3rd Building
18-6, Higashi Ueno 1-chome
Taito-ku, Tokyo 110-0015
Phone +81 3 5689 2914
Fax +81 3 5689 2927
struers@struers.co.jp

NETHERLANDS
Struers GmbH Nederland
Elektroweg 5
3144 CB Maassluis
Telefoon +31 (0) 599 7209
Fax +31 (0) 599 7201
netherlands@struers.de

ÖSTERREICH
Struers GmbH
Zweigniederlassung Österreich
Betriebsgebiet Puch Nord 8
5412 Puch
Telefon +43 6245 70567
Fax +43 6245 70567-78
austria@struers.de

POLAND
Struers Sp. z o.o.
Oddział w Polsce
ul. Jasnogórska 44
31-358 Kraków
Phone +48 12 661 20 60
Fax +48 12 626 01 46
poland@struers.de

ROMANIA
Struers GmbH
Scurusala Sibiu
Str.Scoala de Inot,nr. 18
RO-550005 Sibiu
Phone +40 269 244 558
Fax +40 269 244 559
romania@struers.de

SCHWEIZ
Struers GmbH
Zweigniederlassung Schweiz
Weissenbrunnstraße 41
CH-8903 Birnsdorf
Telefon +41 44 777 63 07
Fax +41 44 777 63 09
switzerland@struers.de

SINGAPORE
Struers Singapore
627A Aljunied Road,
#07-06 BizTech Centre
Singapore 389842
Phone +65 6299 2268
Fax +65 6299 2661
struers.sg@struers.dk

SUOMI
Struers Suomi
Kalevankatu 43
00180 Helsinki
Puhelin +358 (0)207 919 430
Faksi +358 (0)207 919 431
finland@struers.fi

SWEDEN
Struers Sverige
Ekbacksvägen 22
168 69 Bromma
Telefon +46 (0)8 447 53 90
Telefax +46 (0)8 447 53 99
info@struers.se

UNITED KINGDOM
Struers Ltd.
Unit 11 Evolution @ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel. +44 0845 604 6664
Fax +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

USA
Struers Inc.
24766 Detroit Road
Westlake, OH 44145-1598
Phone +1 440 871 0071
Fax +1 440 871 8188
info@struers.com